



**Irina Paula Mendes
Dos Santos
Carvalho**

**Estudo e Implementação de Mecanismos Multicast
em Cenários FTTH/GPON.**



**Irina Paula Mendes
Dos Santos
Carvalho**

**Estudo e Implementação de Mecanismos Multicast
em Cenários FTTH/GPON.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor António Navarro, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e com a colaboração do Engenheiro Paulo Mão Cheia (PTInovação).

Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus irmãos pelo incansável apoio.

O Júri

Presidente

Prof. Dr. António Luís Jesus Teixeira
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. António José Nunes Navarro Rodrigues
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Dr. Ruben Soares Luís
Investigador Centro de Vulcanologia
Universidade dos Açores

Agradecimentos

É com grande satisfação que expresso aqui o meu sincero agradecimento a todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Doutor António Navarro, orientador da presente dissertação e ao colaborador Engenheiro Paulo Mão Cheia (PTInovação), pelo empenho e disponibilidade demonstrados ao projecto.

Agradeço à Tia Carmem, Sr. Jorge Tolentino, Sra. Verónica, Tio Tchutchá, Tia Dos Anjos, Tio Chiquinho, Tio Cândido, Tio Zé Maria, Tio Nando, Elvio, Tó, Alírio, Elídio, Igor, Ludimar, Nuno, Miguel Veiga, Djony, e a todos os meus familiares, colegas e amigos, muito obrigada pelo apoio, amizade e companheirismo ao longo de todos estes duros e longos anos, acreditem que sem vocês tudo teria sido muito mais complicado.

Por fim, agradeço à Universidade de Aveiro, em particular ao Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática e ao Instituto de Telecomunicações – Pólo Aveiro, pelas óptimas condições de trabalho disponibilizadas.

Palavras-chave

Fibra, Redes de Acesso, Rede Óptica, Multicast, FTTx, GPON, Banda Larga, Monomodo, Multimodo, FPGA, Broadband Fórum, Arquitectura de Redes OLT, ONT, ONU, Rede Passiva.

Resumo

A fibra óptica é amplamente utilizada hoje em dia em várias aplicações e áreas, inclusive nas telecomunicações, e cada vez mais na medicina. A sua capacidade de armazenar uma maior quantidade de informação, transportando os mesmos a uma velocidade elevada constitui uma das vantagens sobre os fios de cobre, podendo os cabos de fibra óptica ser usadas tanto para transmissão a curta ou longa distância – ligando redes locais, ou até mesmo países.

No presente trabalho faz-se o estudo de mecanismos de *multicast* nas redes GPON, usando a tecnologia FTTH. Começa-se por se fazer uma abordagem sobre a fibra óptica, motivação, características, e limitações à sua utilização. Analisa-se um sistema de transmissão GPON Ponto-Multiponto e faz-se a implementação de mecanismos de *multicast*, respeitando a norma do *Broadband Fórum/WT-156 Multicast*, num FPGA (*Field Programmable Gate Array*) – Virtex 5, realizada em software, tendo-se usado o ambiente de software integrado *ISE Design Suite 10.1 (Integrated Software Environment)*.

Keywords

Fiber, Access Network, Optical Network, Multicast, FTTx, GPON, Broadband , Mono-Mode, Multi-Mode, FPGA, Broadband Forum, Network Architectures, OLT, ONT, ONU, Passive Network.

Abstract

The optical fibre is widely used today in many applications and areas, including telecommunications, and increasingly in medicine. Their ability to store a larger amount of information, carrying the same at high speed is one of the advantages over copper wires, and they can be used both for transmission to short or long distance - connecting local area networks, or even countries. This work is the study of mechanisms for multicast networks using GPON FTTH technology. Begins by making an approach to optical fiber, motivation, characteristics, and limitations on its use. It analyzes a transmission system GPON Point-to-Multipoint and makes the implementation of multicast mechanisms, respecting the rule of Broadband Forum/WT-156 Multicast, in a FPGA (Field Programmable Gate Array) - Virtex 5, held in the integrated software environment ISE Design Suite 10.1.

Índice

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvi
Acrónimos.....	xvii
Capítulo 0 - Introdução	- 2 -
Capítulo 1 – Fibra Óptica	- 6 -
1.1 Motivação e Vantagens da Fibra Óptica	- 6 -
1.2 Características da Fibra Óptica	- 8 -
1.2.1 Princípio de Operação	- 9 -
1.2.2 Tipos de fibras	- 12 -
1.3 Conceitos Ópticos Importantes	- 16 -
1.3.1 A Luz	- 16 -
1.3.2 Crosstalk	- 19 -
1.3.3 Perdas por Retorno Óptico (Backreflection Loss).....	- 19 -
1.3.4 Espectro Electromagnético	- 21 -
1.4 – Limitações da Fibra óptica	- 22 -
1.4.1 Dispersão.....	- 22 -
1.4.2 Compensação óptica da dispersão.....	- 25 -
1.4.3 Efeitos não Lineares.....	- 25 -
1.4.4 Atenuação.....	- 28 -
Capítulo 2 – Tecnologia FTTx/GPON	- 32 -
2.1 FTTx	- 32 -
2.1.1 FTTN e FFTC.....	- 32 -
2.1.2 FTTH e FTTB.....	- 34 -
2.2 RoF	- 36 -
2.2.1 Vantagem do RoF.....	- 37 -
2.2.2 Limitações do RoF.....	- 39 -
2.3 Porquê FTTH/GPON	- 39 -
2.4 Arquitecturas PON.....	- 40 -
2.4.1 Tipos de Redes de Acesso PON	- 41 -
2.4.2 Topologias das Redes de Acesso.....	- 48 -
2.4.3 Aplicações nas Redes de Acesso.....	- 52 -
2.4.4 Componentes para as Redes de Acesso.....	- 53 -
2.5 GPON	- 55 -

2.5.1 Princípios de funcionamento.....	- 57 -
2.5.2 Características técnicas	- 59 -
2.5.3 Arquitectura GPON TDM (Multiplexagem por Divisão no Tempo)	- 64 -
2.5.4 Funcionalidades dos componentes de uma rede de acesso GPON.....	- 66 -
2.6 Normas de Comunicação Óptica	- 70 -
2.6.1 Normas Primárias.....	- 70 -
2.6.2 Normas para Testes de Componentes	- 71 -
2.6.3 Normas de Sistema	- 71 -
Capítulo 3 - Caso de estudo	- 74 -
3.1 Canal de Transmissão (Tx)/ Recepção (Rx)	- 74 -
3.1.1 Transmissores ópticos	- 75 -
3.1.2 Receptores ópticos	- 76 -
3.1.3 Especificações do meio físico – Camada de Convergência de Transmissão (G.984.2).....	- 78 -
3.2 Cenário de aplicação Tx/Rx: GPON/FTTH.....	- 80 -
4.2.1 Funcionalidade <i>Multicast</i>	- 80 -
3.2.2 Simulação e discussão dos resultados	- 82 -
3.2.3 Possível optimização do cenário simulado.....	- 85 -
Capítulo 4 - Proposta de Implementação de Mecanismo <i>Multicast</i> no OLT PON, usando o Virtex 5	- 86 -
4.1 Broadband Fórum/ WT-156 - Acesso GPON no contexto do TR-101.....	- 86 -
4.2 Broadband Fórum/ WT-156 § 5.3 IGMP Controlled Multicast. [19]	- 86 -
4.3 FPGA	- 101 -
4.3.1 OLT PON num chip FPGA	- 102 -
4.3.2 Arquitectura Virtex.....	- 103 -
4.3.3 Implementação IGMP Controlled Multicast no OLT PON no VIRTEX 5	- 105 -
Capítulo 5 - Conclusões Finais	- 110 -
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	- 111 -
Referências Bibliográficas	- 114 -

Lista de Figuras

Figura 1 - Os 20 países com maior implantação da tecnologia FTTH/B, até final de 2008. [2]	- 2 -
Figura 2 - Visualização da reflexão interna total no núcleo da fibra óptica. [3]	- 9 -
Figura 3 – Lei de Snell	- 10 -
Figura 4 – Trajectória dum raio de luz na Fibra Monomodo	- 13 -
Figura 5 – Fibra Multimodo do tipo Índice Degrau.	- 14 -
Figura 6 – Fibra Multimodo – tipo Índice Gradual	- 15 -
Figura 7 – Interferência Construtiva	- 17 -
Figura 8- Interferência Destrutiva	- 17 -
Figura 9 – Distribuição dos campos Eléctrico e Magnético num determinado instante de tempo.	- 18 -
Figura 10 – Perda por retorno óptico [5].	- 20 -
Figura 11 – Espectro electromagnético.	- 21 -
Figura 12 – Banda espectral para comunicações ópticas.	- 21 -
Figura 13 - Dispersão nas fibras, mediante o diâmetro do núcleo. [6]	- 24 -
Figura 14 - Exemplo de um circulador com 3 portas.	- 25 -
Figura 15 – Deformação na fibra: Macro-curvatura.	- 30 -
Figura 16 - Deformação na fibra: Microcurvatura.	- 30 -
Figura 17 – Tecnologias FTTN e FTTC. [7]	- 32 -
Figura 18 – Topologias FTTB e FTTH [7]	- 34 -
Figura 19 - Rede óptica activa (AON).	- 35 -
Figura 20 - Rede óptica passiva (PON). [8]	- 35 -
Figura 21 – Rede EPON vs GPON.	- 45 -
Figura 22 – WDM – PON. [14]	- 46 -
Figura 23- TDM – PON. [14]	- 48 -
Figura 24 - Topologia em Estrela.	- 49 -
Figura 25 - Topologia em Árvore.	- 50 -
Figura 26 – Topologia em Anel.	- 50 -
Figura 27 – Topologia em Barramento.	- 51 -
Figura 28 – Topologia Híbrida.	- 51 -
Figura 29 – Elementos de um sistema de comunicação óptica.	- 54 -
Figura 30 - Configuração física genérica da ODN.	- 58 -
Figura 31 - GPON TDM, fluxo descendente. [16]	- 64 -
Figura 32 – GPON TDM, fluxo ascendente. [16]	- 65 -
Figura 33 – Funções do GPON – OLT. [16]	- 66 -
Figura 34 – Funções do GPON – ONU. [16]	- 67 -
Figura 35 – Circuito de um Repartidor PLC (Planar Lightwave Circuit). [17]	- 68 -
Figura 36 – Transmissor óptico	- 75 -
Figura 37 – Esquema do sistema GPON simulado para um único utilizador.	- 82 -

Figura 38 - Esquema do sistema GPON simulado para 32 utilizadores. _____	- 82 -
Figura 39 - Diagrama de olho da transmissão do tráfego descendente. _____	- 82 -
Figura 40 - Pilha protocolar dum nó GPON, com todas as camadas. _____	- 93 -
Figura 41 - Vista das sub-camadas de adaptação e de framing. _____	- 93 -
Figura 42 – Quadro GPON, fluxo descendente - campo PCBd _____	- 95 -
Figura 43 – Quadro com os campos do conteúdo (payload) _____	- 96 -
Figura 44 – Campo Payload GPON, fluxo ascendente - GEM _____	- 96 -
Figura 45 – Estrutura do quadro GEM. _____	- 97 -
Figura 46 – Diagrama de blocos do sistema GPON. [21]. _____	- 98 -
Figura 47 - Diagrama de blocos do OLT – GEM. [21]. _____	- 98 -
Figura 48 - Adaptação Ethernet do GPON GEM. _____	- 99 -
Figura 49 - Fluxograma mostrando os passos da transmissão de dados, usando quadros GEM. _____	- 99 -
Figura 50 - Fluxograma mostrando os passos da recepção de dados, usando tramas GEM. _____	- 100 -
Figura 51 - Família VIRTEX 5 usada. _____	- 104 -
Figura 52 – Implementação da funcionalidade Multicast feita no OLT para o Virtex 5, usando o ISE 10.1. _____	- 108 -
Figura 53 – Propriedades do projecto. _____	- 109 -

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Temperatura, Raio de Curvatura e Abertura Numérica das fibras _____	- 16 -
Tabela 2 - Atenuação e Aplicação nas Fibras. _____	- 16 -
Tabela 3 - Largura de banda para as várias fibras. _____	- 16 -
Tabela 4 - Diferenças entre o GPON e o EPON. _____	- 46 -
Tabela 5 - Débitos na tecnologia GPON, em ambos os sentidos _____	- 58 -
Tabela 6 - Recomendações ITU-T para Redes e Ligações Ópticas _____	- 72 -
Tabela 7 - Potência inicial, no caso de se ter uma fibra e 2.488Gbps, fluxo descendente _____	- 79 -
Tabela 8 - Valores normalizados da sensibilidade e sobrecarga dos detectores, APD e PIN _____	- 79 -
Tabela 9 - Potência inicial, no caso de se ter uma fibra e 1.244Gbps, fluxo ascendente _____	- 79 -
Tabela 10 - Atenuação permitida entre o OLT e o ONU _____	- 80 -
Tabela 11 - GPON: Aplicações e soluções. _____	- 106 -

Acrónimos

ADSL - Asymmetric Digital Subscriber Line

AES - Advanced Encryption System (Sistema Avançado de Encriptação)

AF - Adaptation Function (Função de Adaptação)

ALM - Adaptative Logic Modules (Módulos Lógicos Adaptáveis)

ASIC – Application Specific Integrated Circuit (Circuito Integrado para Aplicações Específicas)

ATM – Asynchronous Transfer Mode (Modo de Transferência Assíncrono)

ATM-PON - Asynchronous Transfer Mode PON

BPON - Broadband PON

BNG - Broadband *Network* Gateway

BS - Base Station (Estação Base)

CAPEX – Capital Expenditure

CO – Central Office (Central)

DCF - Dispersion Compensating *Fiber*

DCM - Dispersion Compensating Modules

DCM - Digital Clock Manager (Gestor de relógio digital)

DSLAM – Digital Subscriber Line Access Multiplexer

DSP - Digital Signal Processing (Processamento Digital de Sinal)

DTV – Digital Television (Televisão Digital)

DWDM - Dense Wavelength Division Multiplex

EPON - Ethernet PON

FEC - Forward Error Correction (Correção de Erros de Encaminhamento)

FTTB - Fiber To The Building

FTTN - Fiber To The Node

FTTC – Fiber To The Curb

FTTCab - Fiber To The Cabinet

FTTH - Fiber To The Home

FSAN - Full Service Access Network

GEM - GPON Encapsulation Method (Método de Encapsulação GPON)

GFP - Generic Framing Procedure (Procedimento Genérico de *Framing*)

GPON - Gigabit Passive Optical Network (Rede Óptica Passiva de Gigabit)

GTC - GPON Transmission Convergence layer (Camada de Convergência da Transmissão)

HEC - Header Error Control (Cabeçalho de Controlo de Erros)

IGMP - Internet Group Management Protocol (Protocolo de Internet de Gestão de Grupo)

ITU-T- International Telecommunication Union

LAN - Local Area Network

LUT - Look-Up Table

MAC – Medium Access Control (Controlo do Acesso ao Meio)

MDU - Multi-Dwelling Unit (Edifícios, prédios com várias instalações)

MMF - Multi Mode Fiber

MPCP - Multi-Point Control Protocol

NE - Network Element (Elemento da Rede)

UNI - User Network Interface (Interface do Utilizador na Rede)

OAM - Operation, Administration, Maintenance (Operações, Administração e Manutenção)
GPON)

OAM&P - Operation, Administration, Maintenance and Provisioning

ODN - Optical Distribution Network (Rede Óptica de Distribuição)

OLT - Optical Line Terminal (Terminal Óptico de Linha)

OLTS - Optical Loss Test Set (Conjunto de Testes de Perdas Ópticas)

OMCC - ONU Management and Control Channel (Canal de Controlo e Gestão da ONU)

OMCI - ONU Management and Control Interface (Interface de Controlo e Gestão da ONU)

ONT - Optical Network Termination (Terminação da Rede Óptica)

OPEX – Operational Expenditure

OTN - Optical Transport Network (Rede Óptica de Transporte)

OTDM - Optical Time Division Multiplex

PLI - Payload Length Indicator (Indicador do Comprimento da Carga Útil)

PLL - Phase Lock Loop (Bloqueio da Fase)

PLOu - Physical Layer Overhead upstream (Camada Física, fluxo ascendente)

PLOAM - Physical Layer Operations, Administration and Maintenance (Camada física de Operações, Administração e Manutenção)

PON – Passive Optical Network

PMD - Polarization Mode Dispersion

PTI - Payload Type Indicator (Indicador do Tipo da Carga Útil)

P2MP - Point-to-Multipoint (Ponto-a-Multiponto)

P2P – Point-to-Point (Ponto-a-Ponto)

RAU - Remote Antena Unit

RIN - Relative Intensity Noise

RoF - Radio over Fiber

RTD - Round-Trip-Delay

SCM - Sub-Carrier Multiplex

SDH - Synchronous Digital Hierarchy

SERDES – Serializer / Deserializer

SMF - Single Mode Fibre

SNI - Service Network Interface (Interface de Serviço na Rede)

SONET - Synchronous Optical Networking

STP - Spanning Tree Protocol

STB – Set-Top Box

TDMA – Time Division Multiple Access

T-CONT - Transmission Containers

UNI - User Network Interfaces

VCI - Virtual Channel Identifier (Identificador Virtual do Canal)

VDSL – Very- high-speed Digital Subscriber Line

VLAN - Virtual Local Area Network (Rede Local Virtual)

VoD – Video on Demand

VoIP – Voice over Internet Protocol (Voz sobre o Protocolo Internet)

VPI - Virtual Path Identifier (Identificador Virtual do Caminho)

WDM - Wavelength Division Multiplex

WDM-PON - Wavelength Division Multiplexing PON

WLAN - Wireless Local Area Network

UMTS - Universal Mobile Telecommunication System

xQAM - x - Quadrature Amplitude Modulation

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplex

Capítulo 0 - Introdução

"The only thing left is optical fiber". [1]

Hoje em dia, serviços até á casa dos clientes são mais populares do que nunca, possibilitando mais opções, e consequentemente maior competitividade nos preços aos consumidores. Tendo em conta que cada vez mais as pessoas trabalham a partir de casa, surge um aumento na procura de serviços digitais: e-mail, rádio, TV, acesso á Internet; TVD, VoD, Video-vigilância, VoIP, etc., permitindo assim aos utilizadores finais conduzirem os negócios, como se estivessem no local de trabalho.

Nas últimas décadas temos vindo a assistir a uma evolução considerável das comunicações sobre a fibra óptica. Os investigadores têm vindo a desenvolver diversas técnicas de transmissão únicas para ligações ópticas, componentes ópticos passivos e activos e ferramentas de modelação baseadas em softwares para componentes, ligações e redes. Esta evolução fez com que as redes ópticas actuais pudessem permitir taxas de transferência de dados mais elevados, ao longo de grandes distâncias, tanto para as ligações terrestres como para as transoceânicas.

Na figura seguinte consta uma análise feita em Fevereiro de 2009, onde se poderá visualizar a implantação dos serviços FTTH/B no mercado mundial:

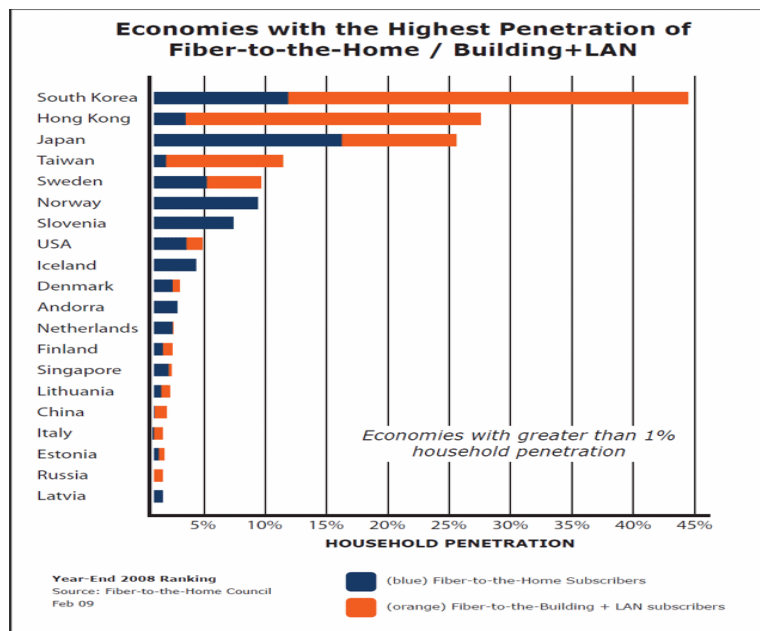


Figura 1 -Os 20 países com maior implantação da tecnologia FTTH/B, até final de 2008. [2]

Pode-se visualizar na Figura 1 que ainda muitos países desenvolvidos têm taxas de implantação das tecnologias FTTx abaixo dos 15%. Isto talvez se deva ao facto das indústrias ópticas reconhecerem que a saúde da mesma depende da diminuição dos custos operacionais -*OPEX (Operational Expenditure)* das operadoras, como também das despesas de capital -*CAPEX (Capital Expenditure)*.

A gestão de tráfego controla o acesso ao meio partilhado avaliando, a largura de banda disponível de várias formas para um determinado nível de serviços de pacotes. Por isso, a gestão do tráfego é uma funcionalidade necessária nas redes actuais e em equipamentos de telecomunicações visto que cada vez mais serviços são entregues via pacotes em meios de transporte partilhados. Este tipo de entrega é mais rentável devido ao ganho alcançado com a multiplexagem estatística, sendo a gestão de tráfego essencial para maximização do ganho.

A maioria dos projectistas necessitam de funcionalidades únicas para os seus sistemas, de baixo custo e alto desempenho. A crescente utilização de dispositivos de lógica programáveis, FPGAs (*Field Programmable Logic Array*), associada à diminuição do preço dos circuitos integrados que usam os mesmos dispositivos, tornou possível a implementação de sistemas embebidos e de sistemas com maior complexidade, que, anteriormente, implicavam a utilização de circuitos integrados dedicados. Os sistemas que antes necessitavam de projectos de *hardware* muito complexos, agora poderão ser divididos em blocos de *software*, com o suporte de uma plataforma de *hardware*. E projectos, que já utilizam FPGAs, fundamentam ainda mais a integração de novas funcionalidades e características no projecto de lógica programável, visto que os custos envolvendo as ferramentas de desenvolvimento, tanto de *software* como de *hardware*, já são contabilizadas.

O objectivo final deste trabalho é fazer a implementação de mecanismos de *multicast* nas redes FTTH/GPON, usando para esse fim, a família Virtex 5 de FPGAs (*Field Programmable Logic Array*), da *Xilinx*. Numa abordagem simplista, a implementação é realizada em *software*, tendo-se usado o ambiente de *software* integrado *ISE Design Suite 10.1 (Integrated Software Environment)*, através de um sistema composto por uma memória, um contador binário e um comparador de endereços *multicast*, implementado em VHDL, usada para funções de redes, mais especificamente, Encaminhamento *Multicast*. Para se atingir esse objectivo final, esta dissertação começa por estudar as vantagens, características e limitações da fibra óptica no capítulo 1. No capítulo 2, descrevemos a tecnologia FTTx e as arquitecturas

das redes PON existentes, dando maior ênfase ao GPON, e fazemos também referência às normas seguidas na comunicação óptica. No capítulo 3 analisamos um sistema básico de transmissão óptico, fazendo comparações quanto ao alcance e balanço de potência para 1 cliente e para 32 clientes, simulados no OSIP. No capítulo 4 temos a proposta de implementação de mecanismos de *multicast* no OLT PON, usando o FPGA Virtex 5 e respeitando os requisitos da norma *Broadband Forum*. Finalmente as conclusões são apresentadas no capítulo 5.

Capítulo 1 – Fibra Óptica

1.1 Motivação e Vantagens da Fibra Óptica

O desenvolvimento de sistemas de comunicação de fibra óptica teve início com a invenção do laser nos anos 60. As características operacionais deste dispositivo incentivaram os investigadores a analisar o espectro óptico como uma extensão do espectro de rádio e de microondas, para permitir transmissões com capacidades extremamente elevadas. À medida que a pesquisa avançou, foram surgindo diversos problemas complexos que dificultaram o objectivo pretendido, ou seja a obtenção de um sistema de comunicação com uma banda larga elevada.

No entanto, observou-se que certas propriedades de fibras ópticas davam-lhes alguns custos inerentes e outras proporcionavam vantagens operacionais sobre fios de cobre, tornando-as altamente atractivas.

De seguida apresentamos algumas destas vantagens:

- Longa distância de transmissão: a fibra óptica tem perdas de transmissão mais baixa que o fio de cobre, logo os dados podem ser transportados em longas distâncias, reduzindo desta forma o número de repetidores intermediários. A consequência desta redução de equipamentos e componentes proporciona uma diminuição de custos e complexidade do sistema.

- Capacidade de informação elevada: a fibra óptica tem largura de banda mais elevada do que qualquer outra alternativa disponível, e logo maior do que a do fio de cobre, o que significa que mais informações podem ser transportadas através de uma única linha física. Este aspecto leva a uma diminuição no número de linhas físicas necessárias para o envio de uma certa quantidade de informação.

- Tamanho e peso reduzido: o que se deve à própria fibra, que actualmente vêm substituindo os pesados cabos coaxiais. Os cabos de fibra óptica são muito pequenos (aproximadamente da espessura de um cabelo) e tem um grande poder luminoso

O baixo peso e as dimensões pequenas das fibras são vantajosos em relação aos cabos pesados e volumosos, nas condutas subterrâneas nas zonas urbanas e não só.

Também têm aplicações importantes em aviões, satélites e navios onde cabos pequenos e leves são os mais adequados; e ainda em aplicações militares táticas, onde grandes quantidades de cabo devem ser desenroladas e recuperados rapidamente.

- Imunidade à Radiação Electromagnética (EM) e aos raios e relâmpagos: uma característica muito importante das fibras ópticas relaciona-se com o facto de serem feitas com materiais dieléctricos, o que significa que não conduzem electricidade, tornando-as imune a radiações externas. O mesmo não acontece com o fio de cobre que sofre interferências tais como o acoplamento de ruído eléctrico na linha, devido ao facto de estar algum tipo de equipamento nas proximidades. No entanto devem ser consideradas algumas precauções relativas às emissões de luz do laser de forma a evitar possíveis danos nos olhos.

No entanto, os módulos de electrónica necessários nas extremidades da fibra são sensíveis à radiação, precisando por isso de blindagem. Essa característica é um factor muito importante na escolha da fibra a ser usada, de forma a melhorar os sistemas de comunicação existentes.

- Aumento da segurança do sinal: a fibra óptica oferece um elevado grau de segurança de dados, não emitindo normalmente qualquer radiação electromagnética detectável. O sinal óptico fica restrito à área dentro da fibra e qualquer emissão de sinais é absorvido por um revestimento opaco em torno da fibra. Esta característica difere dos fios de cobre, em que os sinais eléctricos podem, muitas vezes, deteriorar-se com facilidade. Este facto faz com que as fibras sejam atractivas para aplicações onde a segurança da informação é muito importante, como nos sistemas governamentais, financeiros, jurídicos, e militares. Como é muito difícil interceptar um cabo de fibra óptica, em determinadas aplicações, como por exemplo utilizar interceptores T nas linhas de fibra óptica, esta característica pode tornar-se numa desvantagem.

- Melhor qualidade do sinal: factores como a imunidade à interferência electromagnética, menos perdas de sinal por unidade de distância da fibra, maior largura de banda são característicos que tornam a qualidade do sinal substancialmente melhor, comparativamente ao fio de cobre.

- Baixo custo: qualitativamente, a fibra é mais barata para aplicações de longas distâncias, e os cabos coaxiais mais baratos para curtas distâncias.

Se os requisitos de um sistema forem: largura de banda elevada e grande distância de transmissão, a utilização da fibra permite uma redução dos custos, comparativamente aos cabos coaxiais, isso por unidade de distância. No entanto, os equipamentos electro-ópticos que se encontram nas extremidades da fibra podem fazer o custo da rede aumentar.

- Fiabilidade e facilidade de manutenção: esta característica resulta essencialmente da sua baixa atenuação, o que implica menos repetidores ou amplificadores ao longo do sistema. Actualmente já existem dispositivos ópticos que apresentam, tempos de vida médios de 20 a 30 anos

Existia também um certo receio de que a fibra se pudesse partir facilmente, e no entanto, actualmente, o vidro da fibra é muitas vezes mais resistente do que o aço. Na realidade, o cabo coaxial é mais frágil do que o cabo de fibra óptica, pois estão mais propensos a deformações e torções, podendo degradar permanentemente o desempenho. Um cabo de fibra de qualidade possui materiais que reduzem as tensões, e elementos limitadores de curvaturas do cabo, tornando-os mais resistentes e ao mesmo tempo flexíveis. A fibra óptica é cada vez mais fácil de instalar e é resistente à variação da temperatura por ser um condutor dieléctrico. Devido à baixa perda de sinal, as taxas de erros na fibra óptica são da ordem de 10^{-9} contra 10^{-6} em cabos metálicos, ou seja, são 1000 vezes inferior.

1.2 Características da Fibra Óptica

A fibra óptica é um filamento de vidro ou de materiais poliméricos com capacidade de transmitir luz. Tal filamento pode apresentar diâmetros variáveis, dependendo da aplicação, indo desde diâmetros ínfimos, da ordem de micrómetros (mais finos que um fio de cabelo) até vários milímetros. As fibras ópticas oferecem um método de transmissão que permite comunicações mais eficientes, mais seguras e mais rápidas do que o cobre.

A fibra óptica carrega informação sob a forma de luz, e a comunicação com luz dá à fibra óptica a capacidade de transportar muito mais informação do que o cobre, que usa electricidade para transportar os sinais.

De seguida vai-se falar sobre os conceitos básicos da transmissão com fibra óptica.

1.2.1 Princípio de Operação

As operações nas fibras ópticas regem-se pelo princípio da Reflexão Interna Total, conforme se pode visualizar na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

A reflexão interna total reflecte 100% da luz, e a imagem reflectida no espelho representa apenas 90%, isso deve-se ao facto da luz se propagar a diferentes velocidades em meios diferentes.

Os diversos meios onde a luz se propaga podem ser através de uma grandeza adimensional – **Índice de Refracção**, o qual representa a razão entre a velocidade da luz no vazio (C), e a velocidade da luz num meio específico (V) – ar, água, vidro.

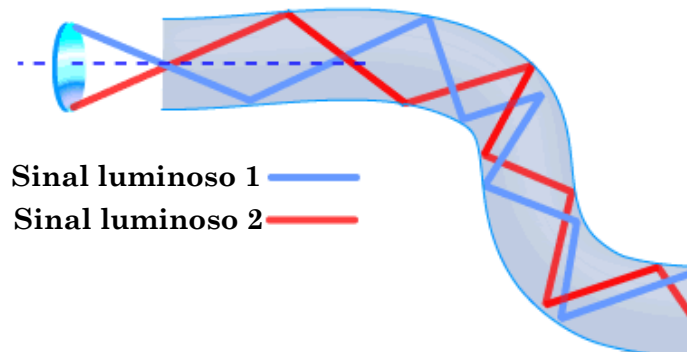


Figura 2 - Visualização da reflexão interna total no núcleo da fibra óptica. [3]

O índice de refração é dado pela:

$$n = \frac{C}{V} \quad (1)$$

A luz é refractada ou reflectida à medida que atravessa meios com diferentes índices de refração. Segundo a **Lei de Snell** [3], se a luz passar de um meio com índice de refração baixo para outro com índice maior, o raio de luz aproxima-se da perpendicular à linha que separa os dois meios; se a luz viajar dum meio com índice de

refracção elevado para um meio com índice menor, o raio de luz tende a afastar-se da normal, conforme se pode ver na Figura 3.

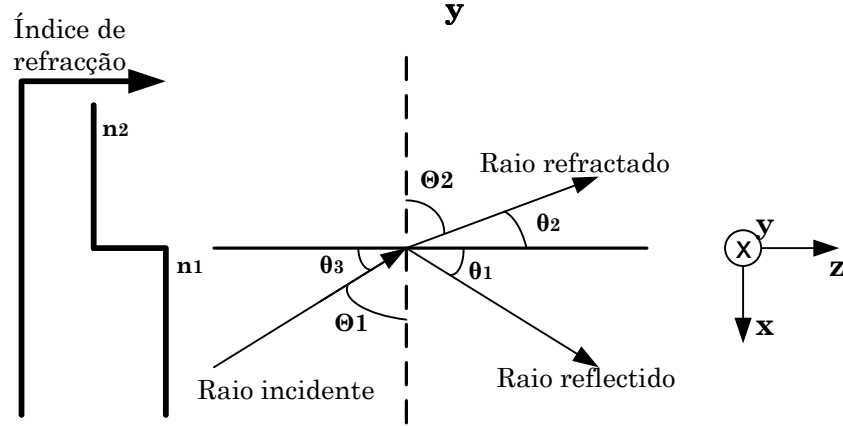


Figura 3 – Lei de Snell

A Lei de Snell é que determina as trajetórias percorridas pelos raios de luz (incidente, reflectida e refractada).

$$n_1 \cdot \sin \Theta_1 = n_2 \cdot \sin \Theta_2 \quad \text{ou} \quad n_1 \cdot \cos \theta_1 = n_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (2)$$

À medida que o ângulo de incidência Θ_1 aumenta, o ângulo de refração Θ_2 aproxima-se dos 90° . O ângulo de incidência que produz um ângulo de refração de 90° é designado por **ângulo crítico** - θ_c . O aumento do ângulo de incidência acima do ângulo crítico provoca a reflexão interna total, em que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

O ângulo crítico, θ_c , é dado pela equação (3):

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3)$$

em que n_1 representa o índice de refração do núcleo da fibra óptica, e n_2 o índice de refração da bainha.

O índice de refração do núcleo duma fibra óptica é maior do que o da bainha ($n_1 > n_2$), e por isso dá-se o fenómeno de reflexão interna total. A luz que entra no

núcleo duma fibra, num ângulo suficiente que permita a reflexão interna total, propaga-se até ser reflectida na interface entre o núcleo e a bainha. Se a luz que entrar numa fibra óptica, tiver um ângulo de incidência menor do que o ângulo crítico, a mesma reflecta-se na bainha e perde-se.

O parâmetro que descreve a capacidade de captação da luz na fibra chama-se **Abertura Numérica** (NA) da fibra, e é dada pela equação 4:

$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

É uma das medidas que caracterizam a fibra quanto ao índice de refração dos meios núcleo e bainha.

O **tempo de propagação** numa fibra óptica, parece ser semelhante ao do cobre, embora esse tempo seja determinado por factores diferentes. Nos cabos metálicos, o atraso depende das dimensões do cabo e da frequência utilizada, e nas fibras o atraso é dependente do índice de refração do material utilizado.

O tempo de propagação é um parâmetro importante em diversas aplicações, por exemplo, nos sistemas que envolvem o envio de vários sinais digitais sincronizados sobre fibras separadas, requerem que todos os sinais cheguem ao destino aproximadamente ao mesmo tempo. Outra aplicação em que se deve considerar o tempo de propagação é o envio de vários sinais com diferentes comprimentos de onda de luz sobre a mesma fibra.

O tempo de propagação da luz na fibra é dado por:

$$t = \frac{Ln}{C} \quad (5)$$

onde t é o tempo de propagação em segundos, L o comprimento da fibra em metros, n índice de refração do núcleo e C a velocidade da luz no vázio.

1.2.2 Tipos de fibras

Para determinadas aplicações, a escolha da fibra deverá ter em consideração os seguintes parâmetros:

- Material da fibra e sua construção;
- Tamanho do núcleo e da bainha;
- Atenuação da fibra, em dB/Km;
- O produto Largura de Banda – Distância da fibra, em MHz.Km;
- Características externas ao sistema, por exemplo o clima.

1.2.2.1 Fibra Monomodo

As fibras monomodo têm núcleos com diâmetro muito pequenos, conforme se poderá verificar na Figura 4, aproximadamente $9\text{ }\mu\text{m}$ (por isso existe apenas um modo e com trajectória linear), transmitem luz laser infravermelha com comprimento de onda de 1300 a 1550 nm, e são usadas para aplicações com taxas de transmissão elevadas e a longas distâncias.

Este tipo de fibras permite uma maior capacidade de transmissão de informação, pois consegue manter a fidelidade a cada impulso de luz ao longo de grandes distâncias, evitando que a dispersão provocada por vários modos - a largura de banda utilizável é maior do que em qualquer dos tipos de fibra multimodo.

Esta fibra possui baixa atenuação, o que permite que mais informação possa ser transmitida por unidade de tempo.

Um parâmetro importante das fibras monomodo é o **comprimento de onda de corte**, λ_c , que especifica o menor comprimento de onda para o qual todos os modos da fibra, excepto o modo fundamental, estão em corte. A fibra transmite luz em monomodo, apenas para os comprimentos de onda superiores ao λ_c . Logo, se uma fibra é monomodo em 1310 nm também será monomodo em 1550 nm, mas não, necessariamente, em 850 nm.

Quando uma fibra é fabricada para ser usada como monomodo, o comprimento de onda de corte geralmente é escolhido para ser muito inferior ao comprimento de onda operacional desejado. Por exemplo, uma fibra para ser usada como monomodo aos 1310 nm pode ter um comprimento de onda de corte de 1275 nm.

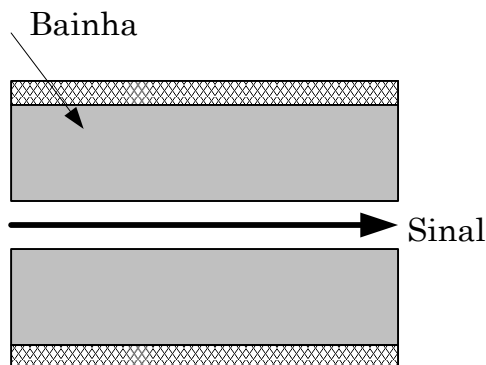


Figura 4 – Trajectória dum raio de luz na Fibra Monomodo

No entanto, a fibra monomodo tem a desvantagem de dificultar a ligação do raio de luz dentro do núcleo devido ao facto do diâmetro do núcleo ser muito reduzido, sendo necessário aumentar a tolerância para os conectores e para a união de dois cabos de fibra.

Os sistemas com comprimento de onda de 1550 nm poderão ser susceptíveis a um número de efeitos limitadores de desempenho, designados por **efeitos não-lineares** (secção 2.3) da fibra, embora os desenhos modernos de fibra monomodo já incluam essas não-linearidades.

1.2.2.2 Fibra Multimodo

As fibras multimodo têm núcleos com diâmetros maiores do que os monomodo, aproximadamente $62,5 \mu\text{m}$, transmitem luz infravermelha com comprimento de onda de 850 a 1300 nm, a partir de díodos emissores de luz (LEDs), e são usados em larga escala para ligações de dados e ligações vídeo, de baixa a média velocidade.

Este tipo de fibra transporta muitos modos, ou raios de luz num guia de onda, em simultâneo, sendo os modos resultantes do facto da luz se propagar dentro do núcleo da fibra somente em alguns ângulos dentro do cone de aceitação (abertura numérica).

Dentro das fibras multimodo distinguem-se dois tipos: índice degrau e índice gradual.

1.2.2.2.1 Tipo Índice - Degrau

Como o índice de refração da bainha é inferior ao do núcleo dá-se a reflexão interna total, pois ao longo da fibra, o ângulo de incidência é menor do que o ângulo crítico.

Neste tipo de fibra, o índice de refração do núcleo é constante, pelo que a energia de um impulso luminoso vai distribuir-se por todos os modos

Considere-se três raios de luz penetrando uma fibra: o 1º modo viaja numa linha recta ao longo do centro do núcleo; o 2º modo viaja com um ângulo íngreme para a frente e para trás, por reflexão interna total; o 3º modo viaja com um ângulo de incidência maior do que o ângulo crítico, penetrando a bainha e parte dele perdendo-se no ar.

Pela Figura 5 pode-se verificar que o segundo modo percorre uma distância maior do que o primeiro modo, e por isso nenhum dos modos chega ao destino ao mesmo tempo, sendo esta diferença entre os tempos de chegada dos modos conhecida como **dispersão intermodal**, ou seja, dá-se um alargamento do impulso que é tanto maior quanto maior for o comprimento da fibra. Este fenómeno limita a aplicação deste tipo de fibra a curtas distâncias e a uma largura de banda de utilização inferior à de outros tipos, sendo utilizada normalmente em transmissão de dados em pequenas distâncias.

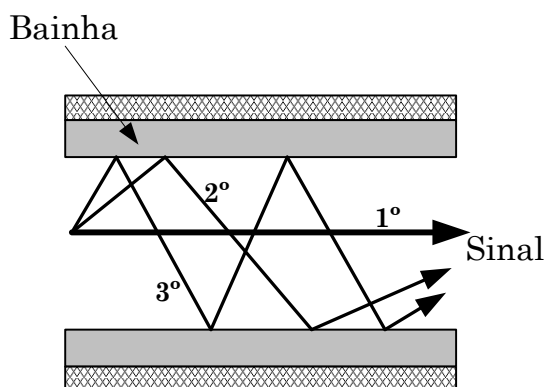


Figura 5 – Fibra Multimodo do tipo Índice Degrau.

1.2.2.2.2 Tipo Índice – Gradual

Desenvolveu-se este tipo de fibra para se compensar a dispersão inerente à fibra multimodo de índice degrau, visto que nesta fibra o índice de refração diminui gradualmente (variação parabólica) longe do centro do núcleo, o que se poderá constatar na Figura 6. O índice de refração elevado no centro do núcleo faz com que a velocidade de alguns raios de luz diminua, sendo o objectivo ter todos os modos do sinal à mesma velocidade no cabo. Esta característica tem o efeito de aproximar os tempos de propagação dos vários modos, reduzindo a dispersão intermodal.

A largura de banda é superior à da fibra multimodo de índice degrau, resultando em larguras de banda que podem ir até 500 Mhz/Km.

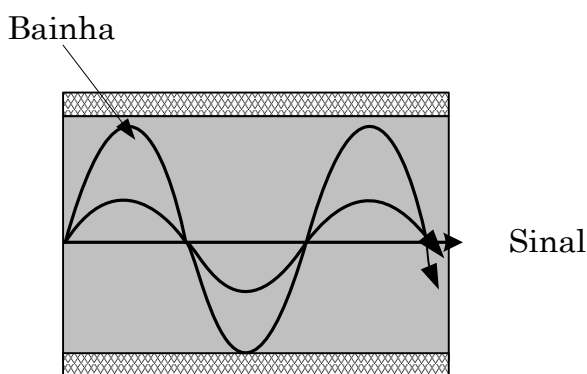


Figura 6 – Fibra Multimodo –tipo Índice Gradual

1.2.2.3 Fibras Multimodo vs Monomodo

A fibra óptica multimodo tem maior capacidade de aglomeração da luz que a fibra óptica monomodo. Em termos práticos, o diâmetro maior do núcleo do multimodo simplifica a união de fibras, e também permite o uso de dispositivos electrónicos mais económicos, tais como díodos emissores de luz (LEDs) e emissores lasers de superfície de cavidade vertical (VCSELs), que operam a 850 nm e 1300 nm (as fibras monomodo usadas nas telecomunicações operam a 1310 nm ou 1550 nm, e requerem fontes de laser mais dispendiosos).

As fibras monomodo são frequentemente, utilizadas em pesquisas de elevada precisão científica. A existência de apenas um modo de propagação da luz faz com que a esta seja mais fácil de focar.

Vejamos alguns parâmetros da fibra, relativamente ao tamanho (Núcleo e Bainha) [4]:

Tabela 1 - Temperatura, Raio de Curvatura e Abertura Numérica das fibras

Tamanho da fibra	Gama de temperatura	Raio de Curvatura mín.	Abertura Numérica
9/125 μm	-60° a +85° C	12 mm	0.14
50/125 μm	-60° a +85° C	12 mm	0.20
62.5/125 μm	-60° a +85° C	12 mm	0.275

Tabela 2 - Atenuação e Aplicação nas Fibra.

Fibra		Aplicação	Atenuação (dB/km)		
Tamanho	Tipo		850 nm	1310 nm	1550 nm
9/125 μm	SM	Telecomunicações	-	0.3 – 0.7	0.2 – 0.3
50/125 μm	MM	LAN or MAN	3.0 – 7.0	1.0 – 3.0	1.0 – 3.0
62.5/125 μm	MM	LAN	3.0 – 7.0	1.0 – 4.0	1.0 – 4.0

Tabela 3 - Largura de banda para as várias fibras.

Fibra		Distância – Largura de Banda (MHz * km)		
Tamanho	Tipo	850 nm	1310 nm	1550 nm
9/125 μm	SM	2,000	20,000+	4,000 – 20,000+
50/125 μm	MM	200 - 800	400 – 1,500	300 – 1,500
62.5/125 μm	MM	100 - 400	200 – 1,000	150 - 500

1.3 Conceitos Ópticos Importantes

1.3.1 A Luz

Nesta secção fazemos uma breve abordagem sobre a natureza da luz, de forma a perceber-se melhor alguns dos componentes mais complexos usados actualmente nos sistemas de transmissão com fibra óptica.

A luz propaga-se como se fosse uma onda de campo eléctrico, E, e magnético M, que oscila. As propriedades da luz são muito importantes para o sucesso dos componentes com fibra óptica. Assim de seguida apresentam-se dois aspectos que afectam o seu comportamento.

1.3.1.1 Interferência

Existem dois tipos de interferências, a construtiva, Figura 7, e a destrutiva, Figura 8, em que na primeira temos duas ondas a propagarem-se na mesma direcção e em fase. O comprimento de onda da luz λ é dado pela distância entre os picos de amplitude da onda.

- Na interferência construtiva, duas ondas de luz estão em fase e têm o mesmo comprimento de onda, produzindo uma única onda, com a amplitude igual á soma das amplitudes das duas originais e com a mesma fase.

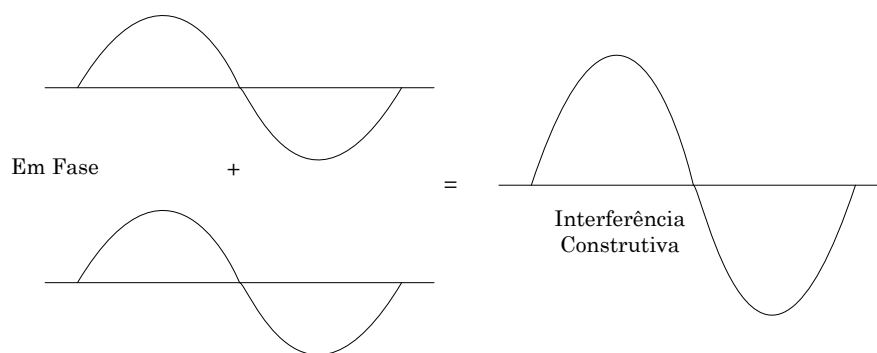


Figura 7 – Interferência Construtiva

- Na interferência destrutiva, temos duas ondas desfasadas, o que provoca um comportamento diferente. Neste caso as duas ondas quase que se cancelam, resultando uma onda com amplitude nula se as duas ondas originais forem exactamente desfasadas, conforme se pode confirmar através da Figura 8.

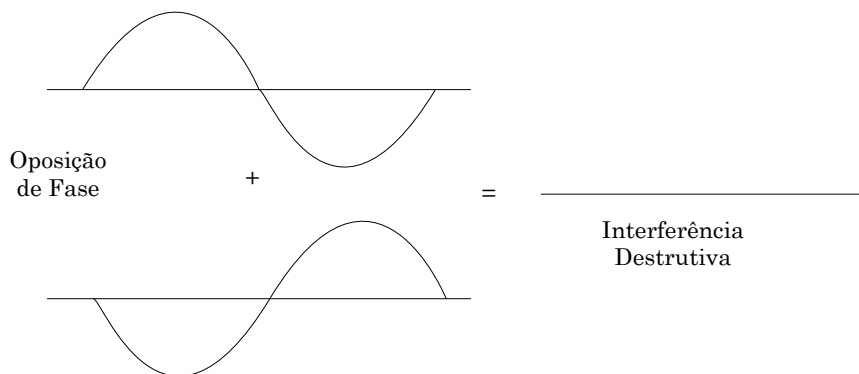


Figura 8- Interferência Destrutiva

A interferência normalmente ocorre quando uma onda coincide com a versão atrasada de si.

1.3.1.2 Polarização

Consideremos ondas de luz a propagarem-se ao longo de campos vectoriais, com dois planos perpendiculares entre si (90°) conforme se pode observar na Figura 9:

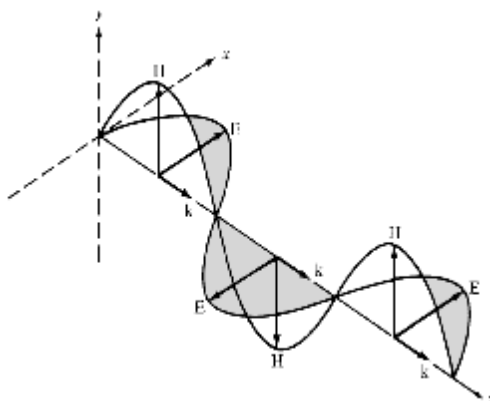


Figura 9 – Distribuição dos campos Eléctrico e Magnético num determinado instante de tempo.

A luz é composta por uma ou mais ondas electromagnéticas transversais, que têm um campo eléctrico (chamado campo \vec{E}) e um campo magnético (chamado campo \vec{H}) do componente.

Como podemos observar na Figura 9, numa onda transversal as direcções de propagação dos campos eléctrico e magnético são perpendiculares entre si e são também perpendiculares à direcção de propagação (designado pelo vector \vec{k}) da onda. As vibrações do campo eléctrico são paralelos uns aos outros em todos os pontos da onda, pelo que o campo eléctrico forma um plano chamado plano de vibração. Da mesma forma, todos os pontos do componente do campo magnético da onda projectam se num plano que é perpendicular ao plano do campo eléctrico.

1.3.2 Crosstalk

O *crosstalk*, ou diafonia é uma perturbação causada pela interferência electromagnética (EMI), em que campos eléctricos ou magnéticos de um sinal de telecomunicações afectam o sinal num circuito adjacente. Descreve o fenómeno em que uma porção do sinal dum canal perde-se, penetrando noutro canal, este fenómeno ocorre maioritariamente em cabos eléctricos, onde o campo eléctrico e o campo magnético podem penetrar em cabos eléctricos vizinhos.

Nas fibras ópticas não ocorre a diafonia uma vez que as perdas de luz numa fibra são infinitesimais e dificilmente penetram em fibras vizinhas. No entanto, poderá ocorrer diafonia em elementos WDM.

As não-linearidades da fibra também podem provocar diafonia nos sistemas com fibra óptica, devido ao índice de refração do núcleo variar de acordo com a intensidade da luz, podendo provocar as não-linearidades FWM (*Four Waves Mix*) e CPM (*Cross Phase Modulation*), embora esses parâmetros só afectem sistemas com elevada potência de saída ($> +10\text{dBm}$), sistemas de longo alcance ($> 100\text{Km}$) ou sistemas que tenham vários comprimentos de onda, com pouco espaçamento entre si. Por exemplo, num circuito de telefonia a diafonia pode resultar na audição de uma conversa de telefone de outro circuito.

1.3.3 Perdas por Retorno Óptico (Backreflection Loss)

A excessiva perda por retorno da reflexão na fibra degrada o desempenho de todas as ligações com fibra baseadas em lasers. A luz reflectida para dentro da cavidade do laser perturba a luz transmitida originalmente, verifica-se que estas perdas ocorrem em conectores, emendas mecânicas e em qualquer componente onde exista uma interface vidro/ar.

Essas reflexões ocorrem devido à entrada da luz reflectida na cavidade do laser, provocando perturbações na onda estacionária, criando ruído. Este é apenas um exemplo de ruído devido ao uso generalizado de isoladores ópticos.

Para prevenir a ocorrência destes efeitos, os lasers têm um isolador e em alguns casos até mesmo dois isoladores, minimizando em 50dB ou mais a perda por retorno da reflexão. O que corresponde, normalmente a 4% da luz incidente.

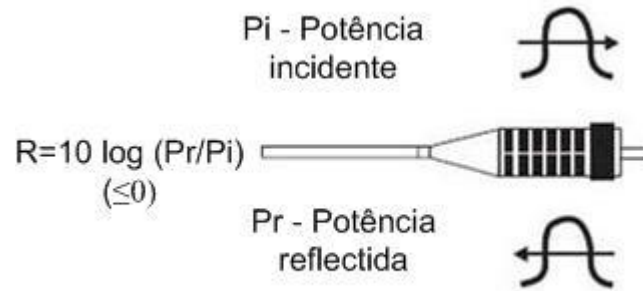


Figura 10 – Perda por retorno óptico [5].

Normalmente, são usados dois termos quando analisamos as reflexões: Reflectância e Perda por Retorno Óptico (ORL). A Reflectância ou Reflexão (R) de um componente é a razão entre a potência refletida (P_r) e a potência incidente (P_i) no componente e é expressa pela equação 6:

$$R(dB) = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \quad (6)$$

A perda por retorno óptico ORL é a razão entre a potência total refletida dada pela soma de todas as reflectâncias dos conectores, acopladores, isoladores e espalhamento *Rayleigh*, e a potência incidente, sendo expressa pela equação 7:

$$ORL = -10 \log \left(\frac{\sum P_r}{P_i} \right) \quad (7)$$

Essas reflexões têm como consequências a perda do sinal óptico transmitido causando interferência na fonte de sinal e provocando o surgimento de ruído interferométrico, aumentando, dessa forma, a taxa de erro de bit (BER). Sendo assim, torna-se fundamental a medição da perda por retorno óptico de um conector em sistemas DWDM de alta capacidade, pois permite monitorizar e se necessário reduzir reflexões que comprometam, totalmente, o desempenho do sistema.

1.3.4 Espectro Electromagnético

O espectro electromagnético organiza a luz em frequências (ou comprimentos de onda), incluindo a banda de luz visível, luz infra-vermelha, e todas as outras frequências espectrais. Os comprimentos de onda da fibra medidos, normalmente em nm.

Os comprimentos de onda usados nas fibras podem ser divididos em duas categorias:

- Visível, no intervalo de comprimentos de onda de 400nm a 700nm, os quais têm pouca aplicação devido às elevadas perdas ópticas nesse intervalo;
- Infra-vermelhos, largamente usados em sistemas modernos com fibras ópticas, com comprimentos de onda na gama 700nm a 1700nm.

A seguir pode-se visualizar um espectro electromagnético na Figura 11:

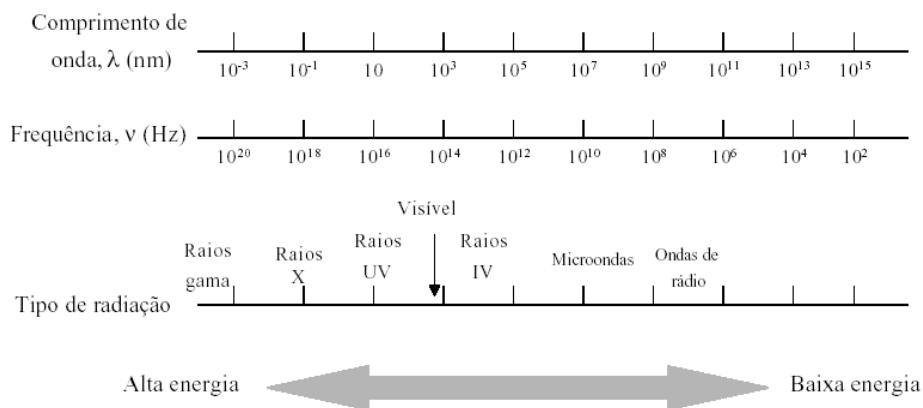


Figura 11 – Espectro electromagnético.

Sendo as designações da banda espectral, nas comunicações ópticas a Figura 12:



Figura 12 – Banda espectral para comunicações ópticas.

As bandas encontram-se divididas da seguinte forma:

- Banda Original (Banda-O): 1260 a 1360nm;
- Banda Estendida (Banda-E): 1360 a 1460nm;
- Banda Curta (Banda-C): 1460 a 1530nm;
- Banda Convencional (Banda-C): 1530 a 1565nm;
- Banda Longa (Banda-L): 1565 a 1625nm;
- Banda Ultra-longa (Banda-U): 1625 a 1675nm;

Existem formas diferentes de medir várias regiões no espectro electromagnético.

Uma delas, é a velocidade da luz c que é igual ao comprimento de onda λ vezes a frequência f , conforme a equação 8:

$$c = \lambda \cdot f \quad (8)$$

onde a frequência é expressa em hertz (Hz), o comprimento de onda em nm e a velocidade da luz em m/s.

Todos estes factores têm um potencial que pode afectar sistemas de transmissão uma vez que os princípios da luz regem todas as operações dos transmissores, receptores e transceptores ópticos.

1.4 – Limitações da Fibra óptica

1.4.1 Dispersão

Embora se desejasse que a fibra óptica tivesse uma largura de banda ilimitada, indo assim de encontro às necessidades de comunicação entre pessoas, à medida que as distâncias de transmissão e requisitos de largura de banda aumentavam, os investigadores da área da óptica viram-se obrigados a explorar uma janela de comprimento de onda adicional para dar respostas a esses requisitos. Uma janela perto dos 1550nm pareceu ser a solução encontrada, apresentando perdas de apenas 0.2dB/1Km, o que parecia ser adequado para toda e qualquer aplicação. Milhões de km em fibra óptica foram instalados pelo mundo, criando-se assim uma rede de comunicações de alta velocidade. No entanto, à medida que a taxa de dados e

comprimento das fibras aumentavam, as limitações devido à dispersão na fibra tornaram-se difíceis de evitar.

O primeiro tipo de fibra, multimodo de índice degrau, apresentou inicialmente um problema de dispersão; o multimodo gradual melhorou ligeiramente a situação; o monomodo é que eliminou a dispersão relacionada com as fibras multimodo.

A dispersão pode ser de dois tipos:

- **Dispersão Cromática ou Intramodal (dentro de cada modo)**

Este tipo de dispersão limita o potencial de largura de banda da fibra, que é o que se quer evitar e ocorre porque diferentes comprimentos de onda viajam, a diferentes velocidades, dentro do mesmo modo. Ela pode resultar da dispersão do material, do guia de onda, ou da dispersão da secção. Em fibras normais, a dispersão do material e o comprimento de onda para o qual a dispersão se anula é próximo dos 1310nm, verificando-se que nas fibras padrão a dispersão é nula exactamente em 1310nm.

Os lasers emitem um conjunto de comprimentos de onda ópticos e a velocidade da luz na fibra varia de acordo com esses comprimentos de onda. Como um impulso de luz do laser, por norma, tem vários comprimentos de onda, os mesmos tendem a espalhar-se no tempo após percorrerem uma porção da fibra.

O índice de refacção decresce à medida que o comprimento de onda cresce e por isso os comprimentos de onda mais longos viajam mais rapidamente. Desta forma o impulso recebido é mais largo do que o transmitido.

Um outro fenómeno que também se pode verificar é o “*chirp*”, que ocorre quando se liga um laser - isto devido ao ligeiro desvio do comprimento de onda, adicionando dessa forma modulação FM ao sinal. Esse fenómeno faz com que o laser tenha um alargamento ainda maior do impulso.

No monomodo a dispersão intermodal desaparece, mas como as diferentes componentes de frequência associadas ao modo viajam a velocidades distintas, a velocidade de grupo associada a cada uma difere - Dispersão cromática (*GVD: Group Velocity Dispersion*), que engloba dois tipos de dispersão:

- Dispersão material
- Dispersão do guia

- **Dispersão Modal ou Intermodal**– PMD (*Polarization Mode Dispersion*)

As fibras monomodo suportam duas polarizações perpendiculares do sinal original transmitido. Se a fibra for perfeitamente arredondada e livre de tensões, ambos os modos de polarização irão propagar-se exactamente à mesma velocidade, resultando num PMD nulo.

Na prática não existem fibras perfeitas pelo que as polarizações perpendiculares podem viajar a diferentes velocidades, chegando ao extremo da fibra em instantes diferentes. A diferença entre os tempos de chegada, normalizada com o comprimento de onda é conhecido como PMD e cuja unidade é ps/\sqrt{Km} . O PMD também provoca o alargamento de impulsos digitais, uma vez que os modos de polarização chegam ao fim da fibra em tempos diferentes. No caso de transmissão digital com elevadas taxas de transferência de bits pode dificultar, ou fazer com que ocorram erros de bits no receptor e sua posterior descodificação, ou então limitação da sensibilidade do receptor.

Os tipos de dispersão que predominam nas fibras são:

- **Multimodo Degrau:** Modal (dezenas de MHz.Km);
- **Multimodo Gradual:** Modal Material (menor que 1 GHz.Km);
- **Monomodo:** Cromática, Material e Guia de Onda (10 a 100 GHz.Km).

Na Figura 13 podemos observar o sinal à saída dos diferentes tipos de fibra devido à dispersão, relativamente ao diâmetro do núcleo:

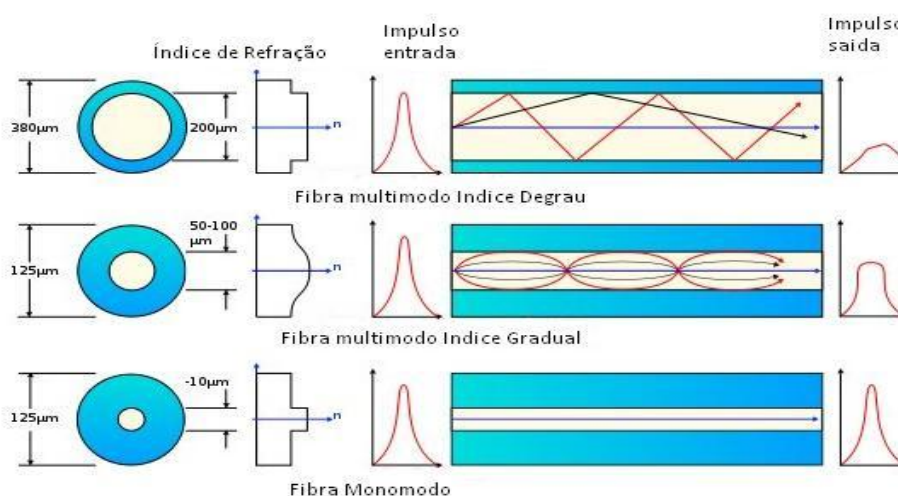


Figura 13 - Dispersão nas fibras, mediante o diâmetro do núcleo. [6]

1.4.2 Compensação óptica da dispersão

Nesta secção será feita a análise de um componente passivo que permite minimizar os efeitos da dispersão na fibra. Geralmente trata-se de um dispositivo com dispersão oposta ao da fibra. Estes módulos de compensação da dispersão, DCM (*Dispersion Compensating Modules*) assemelham-se, normalmente a longas “bobinas” em fibra, com características opostas às da dispersão, as quais podem ser adquiridas com um valor específico de dispersão.

No entanto estes módulos também podem introduzir perdas consideráveis no sistema, da ordem de 8 dB. Os módulos de compensação da dispersão podem ser usados com dispositivos de três portos designados por circuladores, como se pode verificar na figura seguinte:

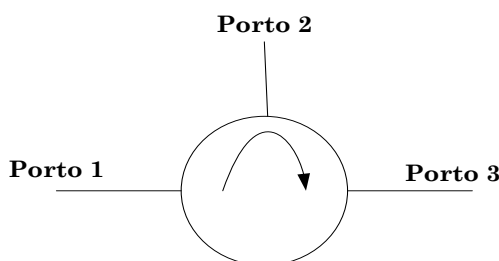


Figura 14 - Exemplo de um circulador com 3 portos.

O modo de funcionamento dum circulador é o seguinte:

A luz entra no circulador pelo porto 1 e sai pelo porto 2. Então a luz viaja através do DCM, reflecte no “reflector” e reentra no porto 2, que por sua vez faz com que a luz saia apenas no porto 3. Assim a luz atravessa o DCM duas vezes, desta forma utiliza-se apenas metade da fibra para atingir o mesmo efeito de compensação.

Os circuladores são também usados com as Redes de Bragg, as quais são “reflectores” que se ligam ao porto 2 do circulador e neste caso os mesmos introduzem a dispersão oposta para limpar/filtrar o sinal.

1.4.3 Efeitos não Lineares

Com o passar do tempo, a taxa de dados, o número de comprimentos de ondas, a distância de transmissão e os níveis de energia foram crescendo, conduzindo a um maior número de efeitos não lineares. Até uma certa altura, os problemas da fibra

estavam relacionados com a atenuação e a dispersão, mas com a necessidade do aumento de desempenho, os efeitos não lineares tornaram-se mais evidentes.

Poder-se-á então afirmar que, as não linearidades e as limitações da largura de banda constituem as restrições para a transmissão sobre a fibra óptica.

As não linearidades mais comuns na fibra são a auto-modulação de fase SPM (*Self-Phase Modulation*), a modulação de fase cruzada XPM (*Cross-Phase Modulation*), a difusão estimulada Raman - SRS (*Stimulated Raman Scattering*), a difusão estimulada Brillouin SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*), e a mistura de quatro ondas FWM (*Four-Wave Mixing*). As não linearidades surgem, essencialmente devido a dois mecanismos:

- O primeiro resulta do facto do índice de refração do vidro variar com a potência óptica, atravessando o material. A energia dependente do índice de refração aumenta as não linearidades CPM, SPM e FWM;
- O segundo factor é o espalhamento (*scattering*), que provoca o aumento do SRS e SBS.

De seguida, apresentamos algumas características das não linearidades referidas anteriormente. [4]

- **SBS:**
 - A interacção entre a onda de luz incidente e os modos de vibração na fibra é que provoca o SBS, limitando dessa forma a quantidade de luz que chega ao receptor;
 - Os projectos de fibra com áreas efectivas maiores têm um limiar de SBS mais elevado, enquantoque para comprimentos de onda maiores o limiar do SBS é mais baixo;
 - Acima do limiar do SBS, a luz de espalhamento devolvida aumenta drasticamente à medida que o ruído se aproxima do receptor;
 - Sem o contra medidas (um processo, dispositivo ou sistema que pode prevenir ou atenuar os efeitos das ameaças a um computador/servidor), as fontes de laser com largura da banda estreita na região dos 1550nm

podem enfrentar o SBS a potências ópticas de +5dBm. O contra medidas pode aumentar o limiar do SBS na região dos 1550nm para +16dBm.

- **SRS:**

- A potência do limiar é aproximadamente +30dBm (1watt);
- Acima do limiar do SRS, o mesmo poderá “tirar” potência aos canais com menores comprimentos de onda, fornecendo a mesma aos canais com comprimentos de onda maiores;
- Os projectos de fibra com áreas efectivas maiores têm maior limiar SRS
- Acima do limiar, o SRS limita a quantidade de luz que chega ao receptor.

- **CPM:**

- O CPM faz com que os vários impulsos que atravessam a fibra interajam entre si, isso através dos seus efeitos múltiplos no índice de refração da fibra;
- Os projectos de fibra com áreas efectivas maiores têm maior limiar de CPM.

- **SPM:**

- O SPM provoca o *chirp* (é um sinal no qual dá-se um aumento de frequência (*up-chirp*), ou diminuição (*down-chirp*) com o tempo.) nos picos ascendentes e descendentes dum impulso óptico, alargando o impulso;
- Afecta apenas o impulso de luz que atravessa a fibra;
- Actua conjuntamente com a dispersão cromática, para impulsos alargados;
- Os projectos de fibra com áreas efectivas maiores têm maior limiar SPM;
- Quanto maior for a dispersão cromática, maior será o SPM, podendo no entanto verificar-se o contrário em sistemas com gestão de dispersão.

- **FWM:**
 - Este factor da fibra aumenta à medida que a dispersão na fibra diminui, atingindo o máximo no ponto de dispersão zero: dispersão cromática elevada implica um FWM menor;
 - É maior em projectos de canais WDM com igual espaçamento, infelizmente nos projectos de DWDM usa-se o espaçamento igual entre canais;
 - Vai aumentando à medida que o espaçamento entre comprimentos de onda diminui;
 - Os projectos de fibra com áreas efectivas maiores têm menor FWM.

1.4.4 Atenuação

À medida que a luz se propaga pela fibra óptica, perde parte da potência pela absorção de luz na bainha, bem como imperfeições do material usado na construção do interior da fibra (guia de onda). A este processo designa-se por atenuação do sinal, o qual é expresso em dB/km. A absorção da luz pelos materiais dentro da fibra, a difusão da luz dentro da fibra e o “escoamento” de luz do núcleo, também contribuem para as perdas. A atenuação ou perda de transmissão pode ser definida como a diminuição da intensidade de energia de um sinal ao propagar-se através de um meio de transmissão. Esta diminuição poderá ser determinada a partir da equação seguinte:

$$\alpha (dB / Km) = \frac{10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)}{L} \quad (9)$$

onde L é o comprimento da fibra, P_{out} é a potência de saída, e P_{in} é a potência de entrada do sinal.

O grau de atenuação dentro da fibra depende do comprimento de onda da luz transmitida, sendo dada pela soma de várias perdas ligadas ao material que é usado nas fibras e à estrutura do guia de onda, fazendo com que a transmissão por fibra óptica não seja um meio 100% eficiente.

Os mecanismos que provocam atenuação são: absorção, espalhamento e deformações mecânicas.

- Absorção

Os tipos básicos de absorção são: a absorção material e a absorção do ião OH-.

A **absorção material** é o mecanismo de atenuação que exprime a dissipação de parte da energia transmitida numa fibra óptica em forma de calor. Neste tipo de absorção temos factores extrínsecos e intrínsecos à própria fibra.

Como factores intrínsecos, temos a absorção do ultravioleta, a qual cresce exponencialmente no sentido do ultravioleta. Temos ainda a absorção do infravermelho, provocada pela vibração e rotação dos átomos em torno da sua posição de equilíbrio, a qual cresce exponencialmente no sentido do infravermelho.

Como factores extrínsecos temos a absorção devido aos iões metálicos presentes na fibra (Mn, Ni, Cr, U, Co, Fe e Cu) os quais, devido ao seu tamanho, provocam picos de absorção em determinados comprimentos de onda exigindo grande purificação dos materiais que compõem a estrutura da fibra óptica.

- Espalhamento

É o mecanismo de atenuação que exprime o desvio de parte da energia luminosa guiada pelos vários modos de propagação em várias direcções. Existem vários tipos de espalhamento (Rayleigh, Raman estimulado, Brillouin estimulado) sendo o mais importante e significativo o espalhamento de Rayleigh. Esse espalhamento é devido à não homogeneidade microscópica (de flutuações térmicas, flutuações de composição, variação de pressão, pequenas bolhas, variação no perfil de índice de refração, etc.)

Esse espalhamento está sempre presente na fibra óptica e determina o limite mínimo de atenuação nas fibras de sílica na região de baixa atenuação. A atenuação neste tipo de espalhamento é proporcional a $\frac{1}{\lambda^4}$.

- Deformações mecânicas

Existem dois tipos de deformações: as chamadas *Micro-curvatura* e as *Macro-curvatura*, as quais ocorrem ao longo da fibra devido à aplicação de esforços sobre a mesma durante o fabrico e instalação do cabo.

- As macro-curvaturas são perdas pontuais (localizadas) de luz por irradiação, ou seja, os modos de alta ordem (ângulo de incidência próximo ao ângulo crítico) não apresentam condições de reflexão interna total devido a curvaturas de raio finito da fibra óptica.

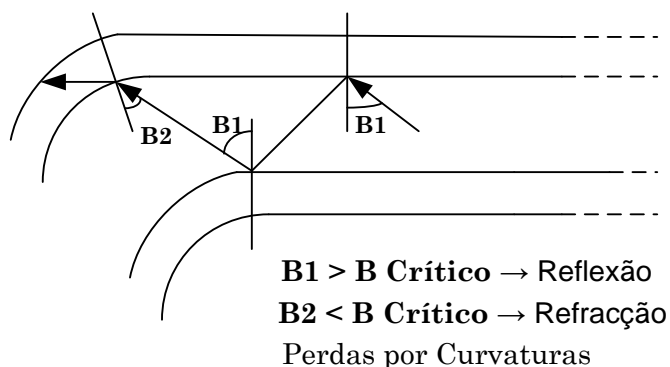


Figura 15 – Deformação na fibra: Macro-curvatura.

- As micro-curvaturas aparecem quando a fibra é submetida a uma pressão transversal, de maneira a comprimi-la contra uma superfície levemente rugosa. Essas micro-curvaturas extraem parte da energia luminosa do núcleo devido aos modos de alta ordem tornarem-se não guiados.

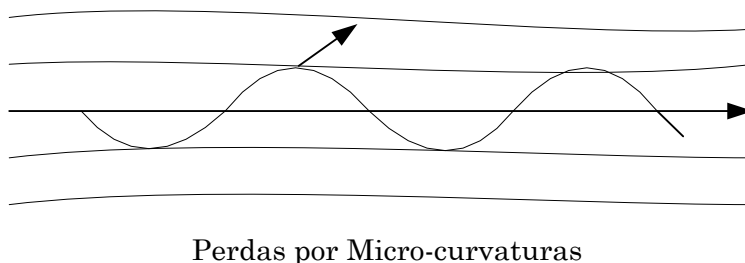


Figura 16 - Deformação na fibra: Microcurvatura.

Existem três comprimentos de onda tipicamente utilizados para transmissão em fibras ópticas:

- - 850 nm com atenuação típica de 3 dB/km;
- - 1300 nm com atenuação típica de 0,8 dB/km;
- - 1550 nm com atenuação típica de 0,2 dB/km..

Neste capítulo, abordamos os aspectos fundamentais da fibra óptica, tendo em conta, as vantagens e limitações na sua utilização. A sua largura de banda “infinita” fez com que se tornasse o elemento essencial das NGN (*Next Generation Networks*).

Capítulo 2 – Tecnologia FTTx/GPON

No capítulo anterior fizemos um estudo das características principais da fibra óptica como meio condutor da luz. Neste capítulo, completamos o capítulo anterior estudando as tecnologias que utilizam a fibra nomeadamente as tecnologias FTTx (*Fiber To The x*) e RoF (*Radio over Fiber*).

2.1 FTTx

FTTx é o nome genérico para a implantação de cabo de fibra óptica até (ou proximidade de) um local específico, em direcção às instalações do cliente. Utiliza-se o "x" para descrever o local onde termina a fibra, conforme se descreve de seguida.

2.1.1 FTTN e FTTC

O FTTN (*Fiber To The Node*), na parte superior da Figura 17, corresponde a uma instalação em que o cabo de fibra chega até a um ponto de distribuição, isto é, um repartidor que serve uma variedade de instalações/edifícios. A terminação até ao cliente baseia-se em redes de cobre, por exemplo, ou então por ligação rádio (*WiMAX*).

O FTTC (*Fiber To The Curb*), na parte inferior da Figura 17, tem o mesmo significado técnico que o FTTN, no entanto sem que a definição esteja formalizada, a área de cobertura do FTTN é geralmente maior do que a do FTTC.

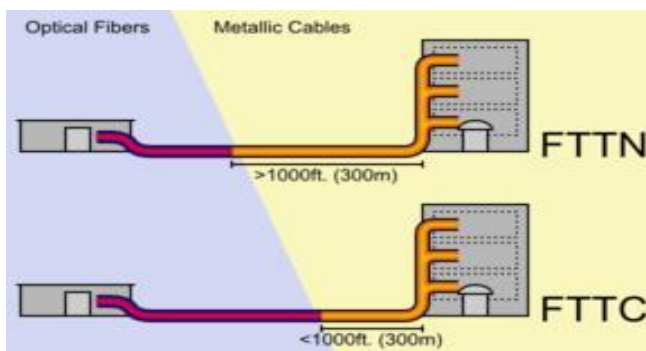


Figura 17 – Tecnologias FTTN e FTTC. [7]

Trata-se de uma solução dita activa, pois necessita de equipamentos activos na rede de cobre (os DSLAM no caso de ser uma terminação via xDSL), ao nível dos repartidores (ou “blocos de rua”).

As principais vantagens do FTTN estão ligadas à sua complementaridade com tecnologias xDSL, nomeadamente VDSL (*Very-high-speed Digital Subscriber Line*) e VDSL2, que proporcionam débitos muito elevados (até 40Mbps de *download*, e 9Mbps de *upload* com o VDSL2, num máximo de 1Km de distância e até 100Mbps de *download* em 300m, podendo suportar 32 a 100 clientes por fibra.

Esta solução permite ainda limitar os custos de serviço no último km, com a utilização da rede de acesso em cobre já existente – é uma solução óptima em termos de CAPEX (*Capital Expenditure*).

A principal dificuldade dessa topologia de rede prende-se com a determinação da posição óptima do DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) em que colocado a uma distância mais próxima dos clientes trás a vantagem de poder fornecer maior débito a cada utilizador final. Em contrapartida, se for colocado a distância mais longa permitirá, fornecer serviços a mais utilizadores, conduzindo deste modo a um menor investimento.

No entanto o FTTC possui alguns inconvenientes devido aos riscos de interferência entre o ADSL2+ e o VDSL/VDSL2 (quanto á banda de frequências utilizadas: ADSL2+ até 2,2MHz; VDSL/VDSL2 de 1,1MHz até 30MHz), cujas soluções em cobre poderão ser:

- Separação das frequências em que se utiliza o VDSL2 a frequências superiores a 2,2MHz, tendo o inconveniente de oferecer menor desempenho;
- Separação física das tecnologias – um único cabo não suporta mais do que um DSL normalizado.

2.1.2 FTTH e FTTB

O FTTH (*Fiber To The Home*), lado direito da Figura 18, corresponde à colocação da fibra até ao cliente permitindo a interligação com fibra entre o CO (*Central Office*) e os clientes, residenciais ou empresariais, permitindo o fornecimento de inúmeros serviços, como por exemplo, TV digital, Rádio Digital, Internet e VoIP. A fibra óptica é colocada até as residências, em substituição dos cabos de cobre ou coaxiais.

O FTTB (*Fiber To The Bulding*), lado esquerdo da Figura 18, corresponde a um acesso em fibra até ao edifício, em que a terminação é feita usando cabos de cobre.

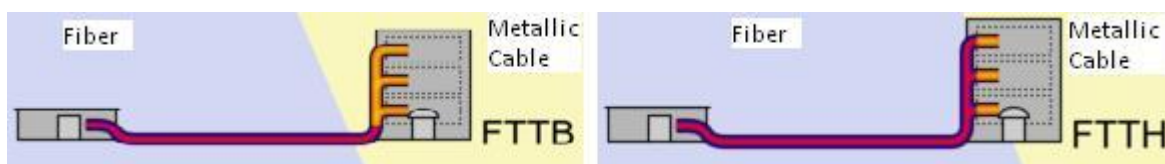


Figura 18 – Topologias FTTB e FTTH [7]

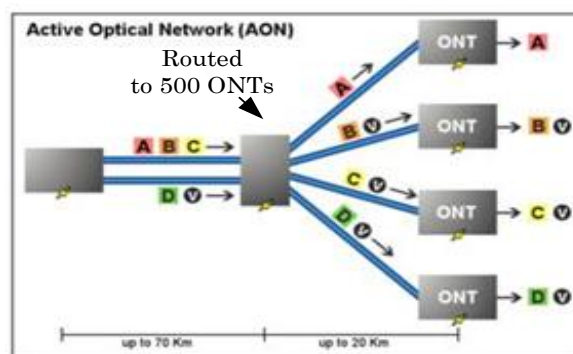
Dentro destas duas tecnologias, temos as redes **passivas** e as redes **ativas** que descrevemos de seguida.

2.1.2.1 Redes Activas

As redes ópticas activas, Figura 19, fazem uso de alguns equipamentos eléctricos para distribuir o sinal como se pode observar na Figura 19 tais como, um *switch*, um *router* ou um *multiplexer*. Cada sinal enviado pela central de serviços é direccionado apenas para o cliente para o qual se destina.

A rede óptica activa mais comum chama-se Ethernet activa, e é um tipo de Ethernet na primeira milha, EFM (*Ethernet in the First Mile*). Esta topologia de rede usa *switches* ópticos Ethernet para distribuir o sinal e deste modo interligar o equipamento do cliente e a central. Essas redes são idênticas às redes Ethernet de computadores, usadas em empresas e instituições académicas, excepto que, neste

caso, o objectivo é ligar residências e edifícios a uma central de serviços em vez de ligar computadores e impressoras dentro de um *Campus*.

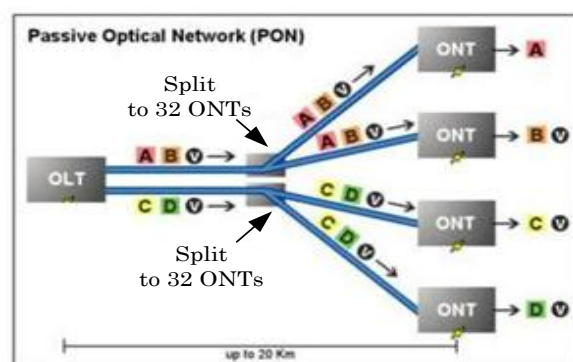


A, B, C, D – Dados ou Voz para um cliente
V – Vídeo para vários clientes

Figura 19 - Rede óptica activa (AON). [8]A rede óptica activa mais conhecida é a IEEE 802.3ah [9] que permite aos fornecedores de serviço entregar até 100 Mbps a cada cliente, em *full-duplex* sobre uma fibra monomodo.

2.1.2.2 Redes Passivas

A rede óptica passiva (PON), Figura 20, é uma arquitectura da rede de acesso até à casa dos clientes, ponto-a-multiponto, em que repartidores ópticos passivos (não precisam de energia) são utilizados para permitir que uma única fibra óptica possa ser dividida servindo várias instalações, normalmente 32 a 128.



A, B, C, D – Dados ou Voz para um cliente
V – Vídeo para vários clientes

Figura 20 - Rede óptica passiva (PON). [8]

A configuração PON reduz o comprimento de fibra, e de equipamentos necessários na central de serviços (OLT) em comparação com a arquitectura ponto-a-

ponto como por exemplo a EPON. O sinal no fluxo descendente proveniente da central é transmitido para todas as instalações dos clientes (ONT) que partilhem a mesma fibra.

Os sinais no fluxo ascendente são combinados usando um protocolo de acesso múltiplo, o acesso múltiplo por divisão temporal (TDMA). O OLT (*Optical Line Termination*) atribui a cada ONU (*Optical Network Unit*) um intervalo de tempo (*time slot*), para evitar que os dados provenientes dos ONUs sejam enviados ao mesmo tempo, provocando colisões.

Voltaremos a discutir as redes passivas PON, numa outra vertente, na secção 2.4.

2.2 RoF

Devido à necessidade de aumento de largura de banda por parte das operadoras móveis, torna-se fulcral que as Centrais estejam aptas para os elevados ritmos de transmissão. Serviços de banda larga sem fios ou móvel já são comercializados, mas apenas em áreas urbanas onde a cobertura é feita por pico-células.

Actualmente, a ligação entre a Central e as antenas é realizada através de meio eléctrico que tem uma elevada variação de atenuação com a frequência, exigindo assim numerosos estágios de amplificação. Os sistemas actuais exigem um elevado nível de processamento em cada estação base, conduzindo a um custo elevado de implementação, sobretudo neste momento em que cada vez mais são necessárias células mais pequenas, para permitir um elevado número de utilizadores com acesso à banda larga.

A tecnologia *RoF* tem o objectivo de transportar por fibra óptica o sinal rádio modulado desde a *Central* até às BSs (*Base Station*). A fibra óptica oferece baixa atenuação (0,2 dB/1Km@ 1550 nm e 0,5dB/1Km @ 1310 nm), até à BS. Esta por sua vez, tem a função de converter sinais ópticos em eléctricos, amplificá-los e difundi-los. Simplifica, por isso, bastante as BSs.

A centralização do processamento do sinal RF permite a partilha do equipamento, gestão dinâmica dos recursos e largura de banda, simplificação do sistema operativo e mais fácil manutenção. Tudo isto leva a redução de custos, principalmente, em zonas populacionais em que são necessárias várias BSs para garantir a cobertura efectiva do sinal.

2.2.1 Vantagem do RoF

A seguir descrevemos as principais vantagens da utilização de *Rádio over Fiber* (RoF):

- **Alocação dinâmica de recursos** - Como todo o processamento é realizado na central de processamento, é possível alocar a capacidade dinamicamente. Permite alocar capacidades, em certos períodos de tempo críticos, para locais como centros comerciais, e posteriormente realocar a capacidade para áreas residenciais, no horário pós-laboral.
- **Baixas perdas por atenuação** – Conforme se verificou anteriormente, os sinais transmitidos em fibra óptica atenuam muito menos que noutro meio de comunicação, especialmente quando comparado com o ar. Através da utilização de fibra óptica, o sinal pode ser transportado até distâncias muito maiores, reduzindo assim a necessidade de repetidores.
- **Redução de consumo energético** - A redução de consumo de energia resulta logicamente da simplicidade das BSs. A diminuição do número de equipamento necessário requer obviamente menor consumo. Para além disso, devemos realçar que em muitas situações não existe na proximidade da BS a rede de energia eléctrica.
- **Baixo custo** – Estruturas simplificadas da Central remota implicam menos custos de infra-estrutura, menor consumo de energia pelos dispositivos e manutenção mais simples, reduzindo em geral os custos de instalação e de manutenção.

- **Baixa complexidade** - RoF faz uso do conceito de uma estação remota (BS) que consiste apenas num conversor de sinal óptico para eléctrico (O/E), amplificadores e a antena. Isto significa que a gestão dos recursos e os circuitos de geração do sinal nas BSs podem ser deslocados para um local central e deste modo passam a ser partilhados entre várias estações remotas.

- **Instalação e manutenção fáceis** - Numa solução RoF todo o equipamento complexo e de processamento é mantido num único local, facilitando a instalação das antenas que não exigem muito equipamento. Em sistemas mais simples apenas requerem um fotodetector, um amplificador RF e uma antena. Como o número de BSs ou RAUs (*Remote Antena Unit*) é muito elevado, torna-se muito importante que sejam simples, o que possibilita uma redução de custos. Também existem muitos RAUs que estão situados em locais de difícil acesso, logo, antenas mais simples serão por isso desejáveis.

- **Elevada largura de banda** - A fibra óptica apresenta 3 janelas de baixa atenuação, 850 nm, 1300 nm e 1550 nm, que combinadas perfazem um total de 50 THz de largura de banda. Actualmente são apenas utilizados 1.6 THz, no entanto, a investigação processe com o objectivo de aumentar a largura de banda utilizável. Técnicas de multiplexagem avançadas como OTDM (*Optical Time Division Multiplex*) combinado com DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplex*) ou até SCM (*Sub-Carrier Multiplex*) permitem aumentar a eficiência da utilização do espectro. Através desta última técnica é possível inserir sinais de vários operadores na mesma rede óptica utilizando várias sub-portadoras.

- **Preparado para o futuro** - As fibras ópticas são projectadas para lidar com velocidades na ordem dos Gigabits, o que significa que serão capazes de lidar com velocidades disponibilizadas pelas futuras gerações de redes, nos próximos anos. A tecnologia RoF é também um protocolo transparente, de taxas de transmissão de bits transparente, portanto, pode ser implantada para usar todas as tecnologias actuais e futuras.

2.2.2 Limitações do RoF

Como o RoF abrange modulação analógica e detecção de luz, é fundamentalmente um sistema de transmissão analógico. Assim sendo, as limitações à transmissão de sinal como o ruído ou distorção, importantes nos sistemas analógicos são aqui também muito relevantes, bem como outros factores tais como o factor de ruído (*Noise Figure*) e a Gama Dinâmica (*Dinamic Range*) das ligações RoF. Em comunicações móveis, este último parâmetro é muito importante, uma vez que a potência recebida dos terminais móveis pode variar muito, dependendo se está mais próximo ou mais afastado da Central.

As fontes de ruído numa ligação analógica óptica, incluem o RIN (*Relative Intensity Noise*), o ruído de fase do laser, o *shot noise* do fotodíodo, o ruído térmico dos amplificadores e a dispersão da fibra. Em sistemas RoF baseados em SMF (*Single Mode Fiber*), a dispersão cromática pode limitar as distâncias das ligações e pode causar a descorrelação da fase, aumentando o ruído de fase. Por outro lado, em sistemas baseados em MMF (*Multi Mode Fiber*) a dispersão intermodal limita drasticamente a largura de banda e a distância. Apesar de o sistema RoF ser analógico, pode transportar sinais digitais (WLAN – *Wireless Local Area Network*, UMTS - *Universal Mobile Telecommunication System*), utilizando diversas técnicas de modulação como xQAM (x - *Quadrature Amplitude Modulation*) ou OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*).

2.3 Porquê FTTH/GPON

O desenvolvimento das redes de acesso tem sido alimentado pela exigência de largura de banda elevada até á casa dos clientes. A solução tem sido a tecnologia óptica, visto que a tanto a largura de banda, como o alcance das redes têm constituído limitações á utilização de cobre nas redes de acesso.

Vejamos de seguida as vantagens da utilização da tecnologia GPON:

- A rede óptica GPON, baseada na Recomendação do ITU-T G.984.x, suporta serviços *triple-play* (dados, voz e vídeo) disponibilizados através de interfaces Ethernet e E1. A adaptação de tecnologias é feita através de GEM (*GPON Encapsulation*

Mode). Estas funcionalidades, acrescidas do suporte de débitos até 2.5 Gbps (*fluxo descendente*) e 1.24 Gbps (*fluxo ascendente*), com um *split ratio* de até 1:128 numa única fibra e com um alcance lógico de até 60 Km tornaram a tecnologia GPON a mais eficiente no contexto das redes ópticas passivas.

- Em oposição a uma arquitectura ponto-a-ponto, em que existe no equipamento da Central um porto físico por cliente, nesta arquitectura ponto-multiponto existe apenas uma interface física (laser e fotodetector) na Central que serve até 64 equipamentos de cliente. Isto conduz a uma redução significativa de custos.

- Toda a rede de distribuição óptica ODN (*Optical Distribution Network*) é baseada em equipamentos passivos, quer seja disponibilizada em conduta quer por via aérea, com um tempo de vida elevado e custo de manutenção, praticamente, inexistente.

- Evolução do acesso dos clientes à Banda Larga de alguns Mbps para até 2.5 Gps.

- Permite fornecer num único equipamento disponibilizado na casa do cliente CPE (*Customer-Premises Equipment*), os seguintes serviços: internet banda larga, IPTV, VoIP, vídeo analógico, etc.

2.4 Architecturas PON

Com o desenvolvimento do serviço de dados de elevada largura de banda e alta velocidade, permitindo VoD (*Video on Demand*), de alta qualidade, os requisitos dos utilizadores para o acesso a dados de banda larga numa rede de acesso pode chegar a 100 Mbps. As formas de acesso por via telefónica (*dial-up*), ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), etc, não poderiam satisfazer as necessidades dos utilizadores da rede e por isso a construção de uma rede de acesso em fibra cresceu rapidamente. A PON é uma rede de acesso que pode satisfazer os requisitos de largura de banda para o

serviço de alta velocidade acima referidos, o que é conveniente para a operação e manutenção da rede.

Geralmente, a PON inclui, principalmente, um OLT localizado na central, uma rede de distribuição óptica ODN (*Optical Distribution Network*) e vários ONUs. O ODN convencional consiste num multiplexador / desmultiplexador e fibras para permitir a interligação do OLT às ONUs. O multiplexador / desmultiplexador é configurado para fazer a desmultiplexagem de um sinal óptico proveniente do OLT e deste modo transmitir sinais ópticos desmultiplexados a cada um dos ONUs. O multiplexador / desmultiplexador também é configurado para multiplexar sinais ópticos provenientes de cada um dos ONUs e produzir á saída um sinal óptico multiplexado para ser enviado ao OLT.

2.4.1 Tipos de Redes de Acesso PON

De acordo com os diferentes mecanismos de realização, as redes PON podem ser classificadas em diferentes tipos, tais como o ATM-PON (*Asynchronous Transfer Mode PON*) que é baseada em ATM, o BPON (*Broadband PON*), EPON (*Ethernet PON*) que é baseada em Ethernet, o GPON (*PON Gigabit*), que tem um débito de Gigabits, o WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexing PON*) que usa a técnica de WDM.

2.4.1.1 APON: ITU-T G.983 [10]

O ITU-T G.983 descreve as especificações iniciais do PON definido pela comissão FSAN (*Full Service Access Network*), usando o ATM como o protocolo de sinalização da camada 2.

A transmissão no sentido descendente é um fluxo contínuo ATM, a uma taxa de 155.52Mbps ou de 622.08Mbps, com células PLOAM (*Physical Layer OAM*) dedicados, dentro do fluxo de dados.

A transmissão do fluxo ascendente é realizada em “rajadas” (*burst*) de células ATM, com 3 bytes concatenadas a cada célula de 53 bytes, para permitir a transmissão e a recepção das “rajadas”.

O termo APON fez com que os clientes pensassem que só os serviços ATM seriam fornecidos, pelo que a FSAN decidiu alterar o nome para banda larga PON (BPON)

2.4.1.2 BPON: ITU-T G.983 [10]

Esta norma foi editada em 1998, sendo uma tecnologia APON modificada, permitindo serviços suplementares tais como a difusão de vídeo. Suporta WDM (*Wavelength Division Multiplex*) e possui alocação dinâmica da largura de banda.

Esta norma foi normalizada pelo ITU-T (*International Telecommunication Union*) [11], possuindo funcionalidades de alto nível, tais como a segurança, a gestão, a qualidade de serviço e configuração, em que todos garantem a interoperabilidade dos diferentes equipamentos.

A transmissão de voz e dados é feita sobre a mesma fibra, sendo reservadas frequências diferentes para a televisão analógica e a digital, evitando assim a sobreposição de comprimentos de onda (*overlay wavelength*).

Actualmente a tecnologia PON é a menos dispendiosa, tendo no entanto os débitos limitados, inicialmente de 622Mbps partilhado entre 32 utilizadores:

- Protocolo de transporte: ATM;
- Fluxo Descendente: 622Mbps, com 1.2Gbps dividido pelos utilizadores;
- Fluxo Ascendente: 155 a 622Mbps

2.4.1.3 EPON - “Ethernet in the first mile”: IEEE 802.3ah [12]

A tecnologia EPON (*Ethernet Passive Optical Network*) é baseada num mecanismo chamado MPCP (*Multi-Point Control Protocol*). Esse mecanismo utiliza mensagens, máquinas de estado e temporizadores para controlar o acesso a uma topologia de rede P2MP.

Nesta topologia cada ONU contém uma classe do protocolo MPCP que comunica-se com uma classe de MPCP no OLT, sendo que na base desse protocolo

reside a subcamada de emulação de Ethernet P2P, o que faz com que uma rede P2MP subjacente pareça ser um conjunto de ligações ponto-a-ponto para as camadas protocolares superiores (no cliente MAC, e acima do mesmo).

E para facilitar a operação e resolução de possíveis problemas da rede introduz-se um mecanismo que permite fazer Operações, Administração e Manutenção (OAM) da rede.

A maior diferença com a APON é que os dados são transmitidos em pacotes de tamanhos variáveis, até os 1.518 octetos, sendo que o APON obriga a utilizar os pacotes ATM de 48 octetos (com 5 octetos suplementares de controlo) – pacotes IP podem ir até aos 65.535 octetos.

Cada pacote Ethernet tem o endereço do ONU (*Optical Network Unit*), ao qual vai ser enviado mas é transmitido a todos os ONU.

A ideia base é evitar a topologia ponto-a-ponto (P2P) e em vez disso ter a ponto-a-multiponto (P2MP) implementada com repartidores ópticos, com fibras PMD (*Polarization Mode Dispersion*) – uma rede deste tipo apresenta uma grande vantagem se não possuir elementos ATM e SONET/ SDH (*Synchronous Optical Networking/ Synchronous Digital Hierarchy*). No entanto se já existe uma rede com esses elementos, transmite-se IP sobre ATM utilizando-se uma arquitectura complexa e dispendiosa, optimizada pela transmissão de voz com conversões eléctrico-ópticas.

A EPON tem débito em ambas as direcções, de 1.25Gbps dividido entre os utilizadores.

Algumas vantagens das EPON:

- Possui um CAPEX muito inferior ao ATM em caso de infra-estruturas novas;
- Uma grande flexibilidade nos serviços disponibilizados;
- Equipamentos de fácil manutenção.

2.4.1.4 GPON - ITU-T G.984 [13]

O GPON foi definido pela recomendação G-984.1 propondo débitos mais elevados (acima de 1 Gb/s) e é compatível com APON e BPON e para além de transportar Ethernet, suporta tráfego ATM e TDM, utilizando o método de encapsulamento GEM (*GPON Encapsulating Method*).

Esta tecnologia distingue-se do BPON, essencialmente, pela sua capacidade de transportar pacotes e tramas Ethernet de tamanhos variáveis. O débito do EPON está limitado aos 1.25Gbps bidireccional, a velocidade de transmissão no GPON é no *download* de 1.24 a 2.48Gbps dividido pelos utilizadores, e no fluxo ascendente é de 155Mbps a 2.48Gbps, permitindo uma maior distância de implantação – 60Km, com máximo de 20Km entre os ONT (3x mais do que o EPON e BPON) e no máximo até 128 linhas por repartidor. O GPON procura ser a tecnologia mais adequada e eficiente em termos de dar suporte a múltiplos serviços, funcionalidades e escalabilidade do OAM&P (*Operation, Administration, Maintenance and Provisioning*).

Alguns dos principais requisitos GPON são:

- Alcance físico de pelo menos 20 km com um alcance lógico dentro do protocolo de 60 km.
- Forte capacidade do OAM&P, oferecendo gestão dos serviços ponto-a-ponto.
- Segurança ao nível protocolar para o tráfego descendente devido à natureza *multicast* das redes PON.

Sendo o trabalho desta dissertação sobre a versão GPON da tecnologia FTTH voltar-se-á a falar do GPON mais aprofundadamente na secção 3.5.

2.4.1.5 EPON vs GPON

As duas tecnologias têm uma diferença notável no que diz respeito à arquitectura:

- O GPON é caracterizado por redes complexas em árvore ao nível da camada 2. É baseado no protocolo ATM e múltiplos protocolos para suportar a estrutura da tecnologia. O EPON é caracterizado por simples redes ao nível da camada 2 utilizando IP para dados, voz e vídeo.

- A estrutura das redes GPON é suportada mediante uma solução de transporte usando múltiplos protocolos, conforme referido anteriormente. Usando a tecnologia ATM, geram-se circuitos virtuais que são provisionados por diferentes tipos de serviços e enviados geralmente desde a Central - CO (*Central Office*) até os clientes. Esse tipo de transporte oferece um serviço de alta qualidade, onde os circuitos virtuais são gerados para cada tipo de serviço oferecido na rede. Adicionalmente, os equipamentos nas redes GPON precisam de algumas conversões de protocolos, segmentação, terminação do canal virtual (VC) e do protocolo ponto-a-ponto (P2P).

Resumindo, a estrutura de rede GPON consiste em múltiplas redes da camada 2 sobre a mesma camada física, em que cada rede possui um protocolo diferente.

De seguida, na Figura 21, apresentamos uma comparação entre as tecnologias EPON e GPON.

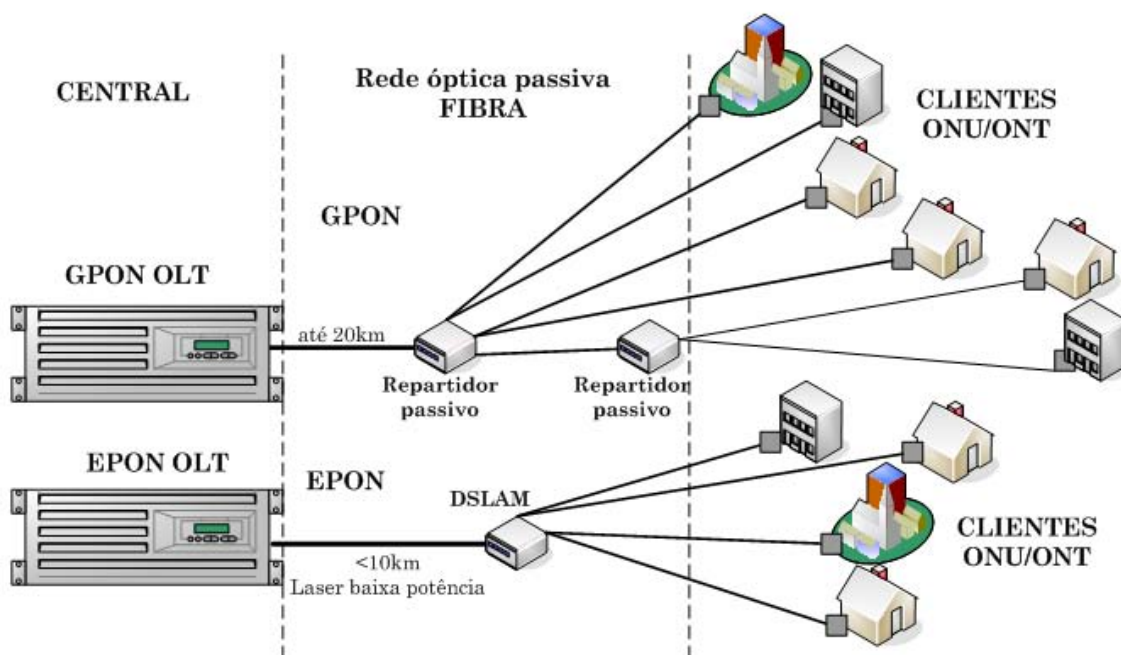


Figura 21 – Rede EPON vs GPON.

Na tabela seguinte apresentamos algumas diferenças entre o GPON e o EPON.

Tabela 4 - Diferenças entre o GPON e o EPON.

	IEEE 802.3ah – EPON	ITU-T G984 - GPON
Taxa descendente	1.25Gbps	2.488Gbps
Taxa ascendente	1.25Gbps	155 Mbps a 2.488Gbps
OAM	Opcional, e dá suporte para informação de falhas, <i>loopback</i> .	Obrigatório. Apoio total para implantação e serviços
Segurança	Não faz parte da Norma.	Para fluxo descendente usa AES
Transporte TDM	Emulação de circuitos	via GEM.
Interfaces de acesso	10/100 Ethernet	ATM, vídeo analógico, TDM e 10/100 Ethernet, POTS
Interfaces de redes	Ethernet	ATM, TDM, Ethernet
Número de ONTs	16, 32	32, 64, 128

2.4.1.6 WDM-PON

WDM é uma tecnologia que faz a multiplexagem de múltiplos sinais de portadoras ópticas numa única fibra óptica, utilizando diferentes comprimentos de onda (cores) de luz laser para transportar sinais diferentes. Isto permite uma multiplicação da capacidade além de possibilitar comunicações bidireccionais através de um fio de fibra. Também é uma forma de multiplexagem por divisão de frequência (FDM), mas é, normalmente, chamado de multiplexagem por divisão de comprimento de onda.

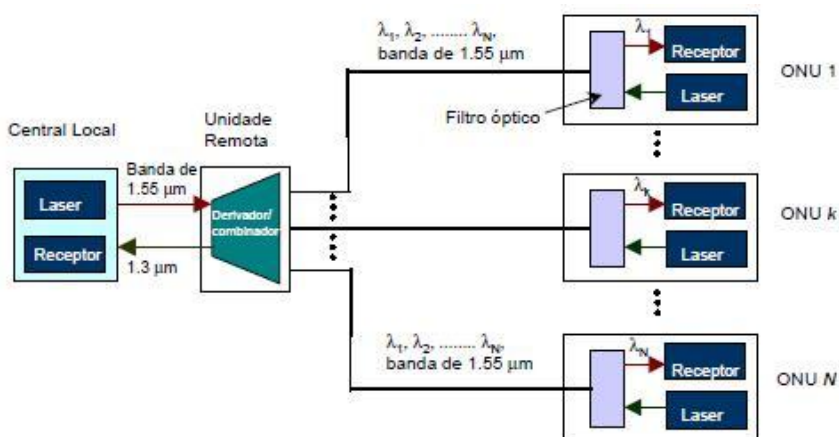


Figura 22 – WDM – PON. [14]

O termo multiplexagem por divisão de comprimento de onda é, normalmente, aplicado a uma portadora óptica (descrito pelo seu comprimento de onda) e por sua vez a multiplexagem por divisão de frequência, geralmente, se aplica a uma portadora de rádio (mais frequentemente descrita por frequência), sendo os dois termos, como já foi referido anteriormente, equivalentes nesse contexto.

Dentro da multiplexagem de comprimento de onda existem o CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*), e o DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*)

2.4.1.7 TDM-PON

É um tipo de multiplexagem digital ou analógica na qual dois ou mais sinais, ou fluxos de bits são transferidos simultaneamente, aparentemente, como sub-canais num canal de comunicação, mas fisicamente vão se revezando no canal. O domínio do tempo é dividido em vários intervalos de tempo (*timeslots*) recorrentes de comprimento fixo, um para cada sub-canal, em que uma amostra byte ou bloco de dados dum sub-canal 1 é transmitido durante um *timeslot*, o sub-canal 2 durante dois *timeslot* e assim sucessivamente.

O trama TDM consiste num intervalo de tempo por sub-canal e após o último sub-canal o ciclo começa de novo com nova trama, começando a partir da segunda amostra, byte ou bloco de dados do sub-canal 1.

Este tipo de multiplexagem permite transmitir simultaneamente vários sinais, dentro do mesmo meio de transmissão, onde cada sinal (canal de comunicação), possui um tempo próprio e definido de uso da banda para transmissão.

O sistema de transmissão da Figura 23 usa a multiplexagem no tempo TDM.

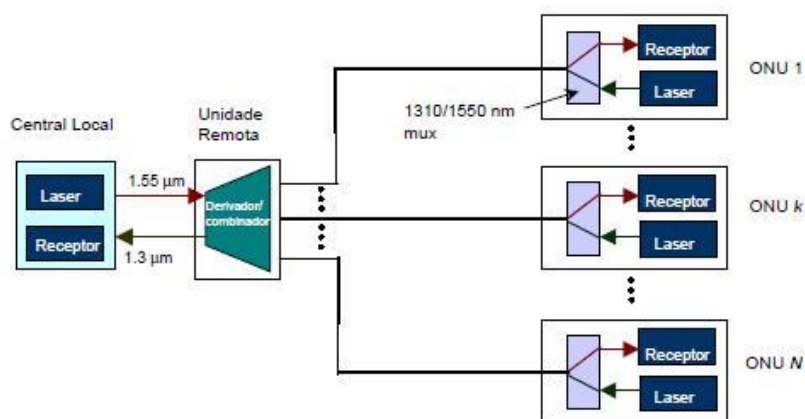


Figura 23- TDM – PON. [14]

2.4.2 Topologias das Redes de Acesso.

2.4.2.1 P2P

A topologia ponto-a-ponto é aquela em que cada utilizador está ligado ao OLT, através de uma fibra dedicada entre a Central OLT e cada um dos clientes ONU, não exigindo partilha de largura de banda, mas com altos custos de instalação, uma vez que requer uma fibra para cada utilizador.

Os serviços de voz, dados e vídeo do fluxo descendente são combinados num comprimento de onda de 1550nm e os serviços do fluxo ascendente são enviados sobre a mesma fibra com o comprimento de onda de 1310nm, podendo operar a 10Gbps com um alcance de 10km.

Este cenário requer uma grande quantidade de fibra óptica, tendo cada uma das fibras os seus próprios transceptores. Apenas obtém-se um rendimento aceitável se cada cliente usar aproximadamente toda a capacidade disponibilizada por uma fibra Ethernet gigabit.

2.4.2.2 P2MP

2.4.2.2.1 Estrela

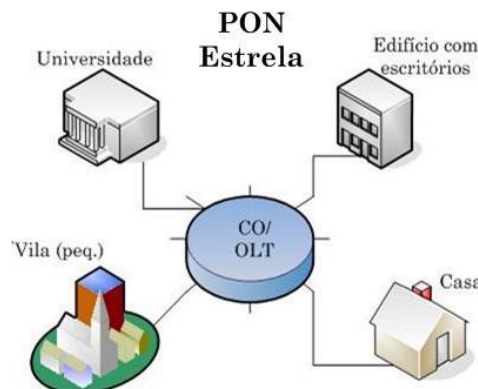


Figura 24 - Topologia em Estrela.

A topologia estrela passiva ou ponto-multiponto, Figura 24, onde o OLT, localizado na Central, faz *broadcast* dos dados para os utilizadores através de repartidores ópticos passivos. Para evitar colisões entre as transmissões dos ONU em direcção ao OLT usa-se a técnica de acesso baseada na multiplexagem (estática) por divisão de tempo (TDMA).

A arquitectura estrela passiva apresenta a grande vantagem de não necessitar de elementos alimentados electricamente, apenas nos extremos da fibra, razão pela qual é chamada de Rede Óptica Passiva ou PON. Esta característica reduz, significativamente, os custos e a complexidade da operação e manutenção da rede.

Prós:

- Fácil de adicionar novas estações (computadores).
- Uma falha num ramo da rede não vai derrubar toda a rede.
- Fácil de resolver os problemas da rede.

Contras:

- Custo com os cabos dependentes do número de estações.
- Ponto fraco da falha da rede inteira com o dispositivo central.

2.4.2.2.2 Árvore

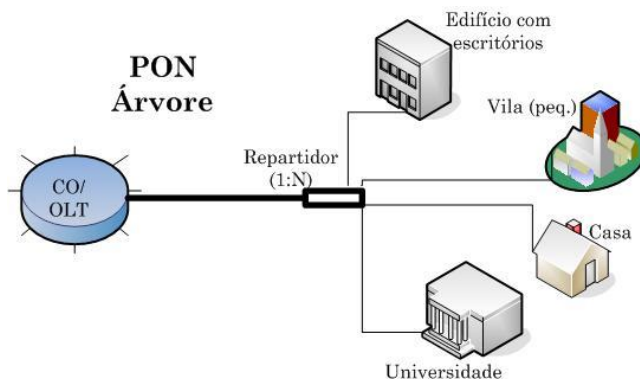


Figura 25 - Topologia em Árvore.

Fisicamente, as redes PON são baseadas na topologia em árvore, Figura 25, sendo a principal razão a formação da rede em que existe apenas uma Central (OLT) comunicando com vários ONUs, estando os últimos espalhados na mesma área.

2.4.2.2.3 Anel

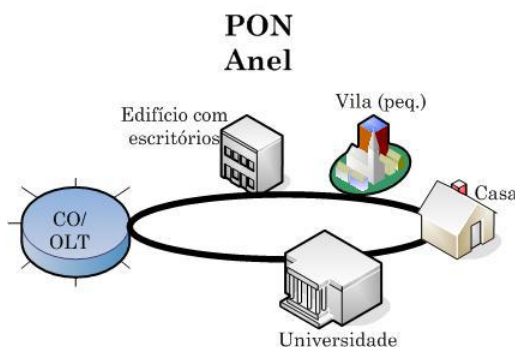


Figura 26 – Topologia em Anel.

A convergência para sistemas em fibra e sem fios (*wireless*) é vista como uma ótima solução para oferecer a capacidade da fibra e a mobilidade das tecnologias sem fio, sendo as redes PON propostas como a rede de suporte.

As arquiteturas em anel, oferecem capacidades de redes locais partilhadas e alocação dinâmica da largura de banda sendo vistas como a solução pois as mesmas também são híbridas, combinando as arquiteturas em árvore e em estrela.

Estas arquiteturas são flexíveis podendo ser usadas como o suporte principal de redes sem fios, incorporando as estações base nas localizações do ONU. Estas redes podem ser escalável a 78 ONUs, sem o uso de amplificadores, sendo transparente a protocolos e débitos de dados, permitindo grande flexibilidade de largura de banda e larga oferta de serviços aos clientes. [15]

2.4.2.2.4 Barramento (Bus)

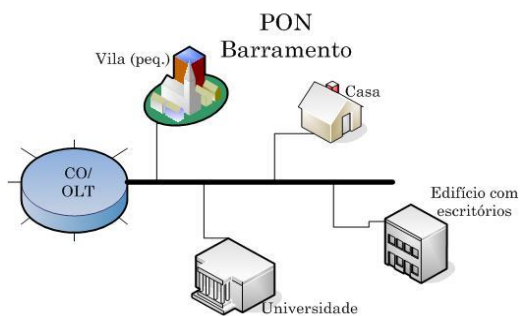


Figura 27 – Topologia em Barramento.

A passividade das redes PON e a topologia em estrela criam uma arquitectura do tipo barramento, onde uma Central (OLT) que está ligada ao centro da estrela envia um sinal para dentro da estrela. Em consequência, todos os utilizadores finais dessa rede recebem uma cópia do sinal.

2.4.2.2.5 Híbrida

Alguns sistemas com televisão por cabo já estão a evoluir para redes híbridas, redes com fibras e cabos coaxiais, bidireccionais.

Uma arquitectura híbrida possível:

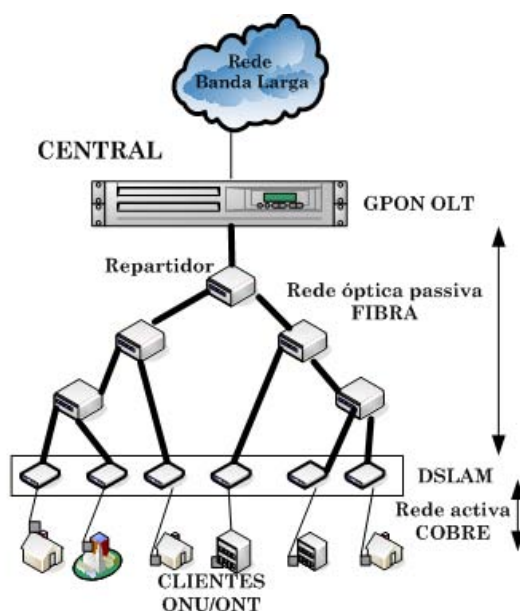


Figura 28 – Topologia Híbrida.

A arquitectura do HFC tem algumas características importantes pois afectam o projecto do protocolo MAC.

- Topologia em árvore: suporta o tráfego ponto-a-multiponto no sentido descendente. No entanto, no sentido ascendente a topologia é em barramento (*bus*), o que faz com que haja a possibilidade de ocorrerem colisões.

Por isso, os canais partilhados no sentido ascendente deverão arranjar uma forma eficiente de evitar que aconteçam colisões.

- As estações são incapazes de detectar colisões: só conseguem “escutar” o tráfego no sentido descendente, o que não acontece na Ethernet onde os adaptadores são capazes de detectar colisões quando ocorrerem.

Assim sendo, as estações recorrem á Central para notificá-los dos resultados das transmissões ascendentes.

- Grande atraso de propagação: o máximo atraso de ida e volta (RTD - *Round-Trip-Delay*) é significativamente maior do que a Ethernet.

É do interesse da sincronização a neutralização do efeito do atraso de propagação, para que as transmissões das estações cheguem no *time slot* certo atribuídos pelo *headend*.

Devido a isso, o protocolo MAC deve ter um regime que vá medir o atraso de propagação para cada estação.

- Assimetria no tráfego ascendente e descendente: O débito no sentido descendente é substancialmente maior do que o ascendente. Sendo assim, a eficiência dos canais no fluxo ascendente é crítica.

2.4.3 Aplicações nas Redes de Acesso

As fibras ópticas podem ser aplicadas em ligações de redes locais, entre equipamentos, ou em ligações de redes intra-continentais.

As redes estão divididas, tradicionalmente, dentro das três categorias seguintes:

- Redes Locais (LANs) - interligam os utilizadores de uma área local como uma sala, um departamento, um edifício, um complexo de escritório ou fábrica, ou um campus - refere qualquer grupo de edifícios que estão a uma distância razoável um do outro, por exemplo, poderia ser um complexo universitário.

As LANs geralmente são exploradas por uma única organização.

- Redes Metropolitanas (MANs) – cobrem uma área maior do que LANs, podendo ser interligações entre prédios que abrangem vários blocos dentro de uma cidade ou podem abranger toda uma cidade e a região metropolitana circundante. Existem também alguns meios de interligar os recursos MAN com entidades de comunicação localizadas nas LANs e nas Redes de longo alcance.

As MANs pertencem e são geridos por várias organizações, e tendem a ser chamados por aplicações *metro*, quando se trata de MANs com aplicações em fibra.

- Redes de longo alcance (WANs) - cobrem uma grande área geográfica, sendo que as ligações podem variar entre as instalações de comutação nas cidades vizinhas a territórios de longa distância (*long-haul*), terrestres ou submarinas com linhas de transmissão que atravessam um país ou entre países.

As WANs são, invariavelmente, pertencentes e geridos por muitas operadoras de transmissão.

- Suporte principal de Rede (Backbone Network) – descreve uma rede de grande capacidade, que liga vários segmentos LAN, MAN ou WAN. No entanto, esse suporte lida com o tráfego entre redes, tráfego esse que provém dum segmento da rede e é transmitido para um outro segmento.

2.4.4 Componentes para as Redes de Acesso

De um ponto de vista simplista, a função de uma ligação em fibra óptica é a de transportar um sinal de um equipamento electrónico (por exemplo, um computador, telefone ou dispositivo de vídeo) num local, para um outro equipamento correspondente num outro local com um elevado grau de confiabilidade e precisão.

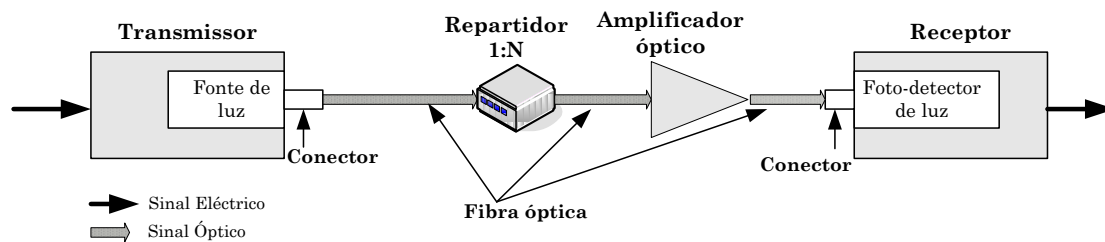


Figura 29 – Elementos de um sistema de comunicação óptica.

Os elementos de um sistema de comunicação por fibra óptica são, conforme se pode ver na Figura 29, os seguintes:

- O transmissor: consiste numa fonte de luz e circuitos electrónicos associados. A fonte pode ser um diodo emissor de luz ou um diodo laser. Os equipamentos electrónicos são usados para fixar o ponto de operação da fonte, controlando a estabilidade da luz à saída, e variando a saída óptica, de forma proporcional a um sinal de entrada electricamente formatado.
- A fibra óptica: a fibra óptica é colocada dentro de um cabo que oferece protecção mecânica e ambiental. Existe uma variedade de tipos de fibras, existindo também muitas configurações de cabo diferentes, dependendo se o cabo está a ser instalado dentro de um edifício, em condutas subterrâneas, ou debaixo de água.
- O receptor: é um foto-diodo que dentro do receptor, detecta o sinal óptico enfraquecido e distorcido emergente a partir do extremo de uma fibra óptica, convertendo-os para um sinal eléctrico. O receptor também contém dispositivos de amplificação e circuitos para restaurar a fidelidade do sinal.
- Fotodetector: age sobre um sinal óptico, detectando do sinal de luz que cai sobre ele e converte a variação da potência óptica para uma corrente eléctrica correspondente.
- Os dispositivos passivos: são componentes ópticos que não necessitam de controlo electrónico para o seu funcionamento. Entre eles estão os conectores ópticos para a ligação de cabos, isoladores ópticos que impedem a luz indesejada de fluir no sentido inverso, filtros ópticos usados para seleccionar apenas um estreito espectro de luz desejado, acopladores geralmente para fins de monitorização do desempenho e circuladores.

- Os amplificadores ópticos (AO): operam somente no domínio óptico sem quaisquer conversões para o domínio eléctrico. São transparentes ao ritmo de transmissão e ao formato da modulação, sendo particularmente úteis em situações em que a distância entre repetidores é limitada pela atenuação (caso geral) – *in-line amplifier*.

Outras aplicações dos AO: pré-amplificadores, pós-amplificadores (*power amplifier*) e amplificadores de compensação numa LAN (*LAN booster amplifier*).

Tipos de amplificadores: Amplificadores de fibra dopada (DFA – *doped-fiber amplifier*), amplificadores de fibra dopada a Érbio EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), amplificadores de semiconductor SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*).

- Os dispositivos activos: os lasers e amplificadores ópticos enquadram-se na categoria de dispositivos activos, que precisam de uma fonte de alimentação, ou um controlo electrónico para o seu funcionamento.

- Conversores de comprimento de onda: são utilizados em redes WDM para transformar dados de um comprimento de onda de entrada para um sinal com comprimento de onda de saída diferente, sem ter a necessidade de qualquer conversão óptico-eléctrico.

2.5 GPON

A rede de acesso GPON é a parte da rede do operador mais próxima do utilizador final, pelo que se caracteriza pela abundância de protocolos e serviços. Esta tecnologia oferece diferentes débitos de transmissão, tanto no sentido ascendente (*upstream*), como no sentido descendente (*downstream*). A taxa de transmissão em sentido ascendente poderá ser de 155 Mbps a 2.488Gbps e no sentido descendente de 2.488Gbps.

Esta tecnologia dá suporte a diferentes tipos de serviços ao cliente, sendo o cliente ATM mapeado de forma transparente no cabeçalho GEM, em ambas as direcções.

O método de encapsulamento da informação que utiliza GPON é chamado: GEM (*GPON Encapsulation Method*) e consiste no encapsulamento eficiente de tráfego do utilizador com a segmentação da trama para permitir maior qualidade de serviço (QoS) para fluxos de tráfego sensíveis a atrasos, tais como comunicações de voz e vídeo.

O GEM permite suportar qualquer tipo de serviço (exemplo: Ethernet, TDM, ATM) e é um protocolo de transporte síncrono baseado em tramas periódicas de 125ms, baseando-se na norma GFP (*Generic Framing Procedure*) do ITU-T, a G.7041, com pequenas alterações para as tecnologias PON.

O processo de fragmentação e reagrupamento, isto é, divisão das tramas grandes em pequenos fragmentos. Isso para facilitar o transporte, diminuindo assim a variação do atraso no tráfego em tempo real e TDM, fazendo depois a combinação dos mesmos no receptor, permitindo a utilização eficiente do meio de transporte. A fragmentação/ reagrupamento e o GEM fornecem a interface de mapeamento ideal - TDM.

O PLOAM (*Physical Layer OAM*) e o OMCI (*ONU Management and Control Interface*) proporcionam uma maior e bem definida capacidade OAM dentro da tecnologia GPON.

O OMCI permite ao OLT estabelecer e libertar ligações através do ONT, gerir os UNIs (*User Network Interfaces*) no ONT, solicitar informações de configuração e estatísticas de desempenho e informar, autonomamente, o operador de sistema de ocorrências tais como falhas de ligação.

A tecnologia GPON implementa capacidades de OAM (*Operation, Administration and Management*) avançadas oferecendo uma gestão eficaz do serviço ponto-a-ponto. Algumas dessas funcionalidades são: alarmes, monitorização da taxa de erro e *ranging* (processo usado pelo OLT para determinar a distância entre este e os ONUs) automático.

Deste modo, o GPON não só oferece maior largura de banda do que as anteriores tecnologias como também é mais eficiente e permite aos operadores continuar a oferecer serviços tradicionais (voz baseada em TDM, linhas alugadas) sem ter de mudar os equipamentos nas instalações dos seus clientes.

2.5.1 Princípios de funcionamento

O GPON é especificado para ser um sistema de fibra única ou dupla, mas quase todos os sistemas GPON são de fibra única, como a popular tecnologia FTTH. Existem poucas razões para se usar duas fibras, embora essa opção seja permitida na norma.

Os únicos equipamentos activos de uma rede GPON são os OLTs e os ONUs. A partir da Central, uma única fibra monomodo (SMF – *Single-mode fiber*) liga-se a um repartidor óptico passivo. O repartidor divide a fibra óptica em N “caminhos” diferentes para os clientes. O número de “caminhos” varia de 2 a 64. A partir do repartidor, uma única fibra monomodo percorre o caminho até o utilizador final. O comprimento máximo de fibra desde a Central até ao utilizador final é de 20 km.

O meio de transporte é a fibra, sendo que a fibra e o repartidor (todos passivos) constituem a rede de distribuição óptica – ODN (*Optical Distribution Network*).

No sentido do fluxo descendente (do OLT para o ONU), uma fibra monomodo (SMF) liga ao primeiro repartidor tornando-se no “tronco da árvore”, sendo o ODN a própria árvore. Cada árvore termina num repartidor ou num ONU/ONT, sendo os últimos as “folhas” da árvore.

No sentido do fluxo ascendente (dos ONUs para o OLT) os vários ramos transportando tráfego são combinados num único ramo usando acopladores ópticos (têm propriedades bidireccionais).

Na ligação *Full Duplex* o transmissor e o receptor podem transmitir dados, simultaneamente, em ambos os sentidos. Esta transmissão bidireccional é conseguida tendo-se redes de fibras separadas para o fluxo ascendente e para o descendente, ou tendo-se uma única fibra com acesso WDM, usando comprimentos de onda diferentes para os fluxos ascendente e descendente.

Como se pode observar na Figura 30, a ODN está localizada entre as ONU e a OLT e em geral a ODN proporciona o meio de transmissão óptico para a ligação física das ONUs às OLTs. Uma ODN é composta pelos seguintes componentes ópticos passivos:

- Cabos de fibras monomodo
- Conectores ópticos
- Dispositivos ópticos de ramificação (*branching*)
- Atenuadores ópticos fixos

- Junções de fusão (*fusion splices*)
- Filtros ópticos
- Dispositivos WDM
- Amplificadores ópticos

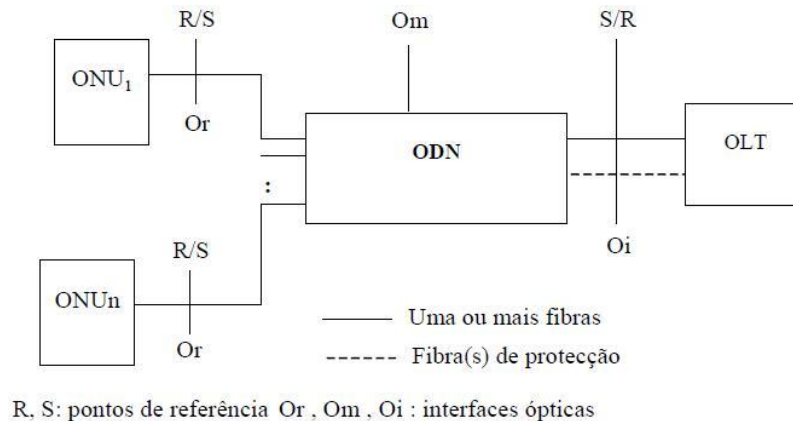


Figura 30 - Configuração física genérica da ODN.

Dependendo da realização física da ODN, os pontos S e R em cada extremidade da ODN podem estar localizados na mesma fibra ou em fibras separadas, oferecendo um ou mais caminhos ópticos entre uma OLT e uma ou mais ONUs.

Cada caminho óptico é definido entre os pontos de referência S e R numa janela de comprimento de onda específica. Na Figura 30 encontram-se definidas as seguintes interfaces ópticas:

Or: interface óptica no ponto de referência R/S entre a ONU e a ODN;

Oi: interface óptica no ponto de referência S/R entre a OLT e a ODN;

Om: interface óptica entre os equipamentos de teste/monitorização e a ODN.

As propriedades ópticas da ODN deverão permitir fornecer qualquer tipo de serviço futuro, sem grandes modificações.

A norma GPON [13] define diferentes débitos de transmissão para no sentido descendente e no sentido ascendente:

Tabela 5 - Débitos na tecnologia GPON, em ambos os sentidos

Direcção do fluxo	Débito de Transmissão
Sentido descendente	2.488.32 Gbps
Sentido ascendente	155 Mbps
	622.08 Mbps
	1.244 Gbps
	2.488 Gbps

2.5.2 Características técnicas

A recomendação G.984.1 do ITU especifica as características genéricas da arquitectura G-PON. Estas são baseadas na série G.983 de modo a permitir compatibilidade com ambientes existentes.

A combinação preferível para o débito de transmissão é de 1.244Gps para o fluxo ascendente e de 2.488 Gbps para o fluxo descendente.

Por exemplo, o GPON disponibiliza também serviços de IPTV e CATV. O de IPTV fornece serviço de vídeo baseado em *multicast* IP, isto é, diferentes programas são configurados com diferentes endereços *multicast* e chegam ao ONU através de uma série de servidores de *broadcast*. Na CATV, os sinais analógicos dos tradicionais canais de TV são transmitidos através dos cabos. Através da conversão eléctrico-óptico, um fluxo de vídeo é convertido numa onda óptica no OLT e adicionada a outras ondas ópticas no GPON, com comprimentos de onda diferentes (sinais de vídeo RF utilizam comprimento de onda de 1550nm). As ondas ópticas são transmitidas num fluxo descendente através da fibra óptica. Depois das ondas chegarem aos ONUs, os sinais de vídeo são separados para fornecer serviço de vídeo.

Nesta secção serão abordadas algumas características do GPON.

- Alcance geográfico

O alcance geográfico da rede GPON, ou seja, a máxima distância entre a OLT e a ONT mais distante, apresenta uma limitação lógica e uma limitação física.

A limitação lógica é de 60 km e está associada aos protocolos de comunicação entre OLT e ONT, que tem como requisito um tempo máximo de recepção de mensagens. A diferença entre a máxima e a mínima distância entre OLT e ONTs não deve superar 20 km, para que o protocolo de *ranging* funcione adequadamente. Poder-se-á então incluir a capacidade de suporte a futuros sistemas de longo alcance usando, por exemplo amplificadores ópticos.

A limitação física do alcance destas redes está relacionada com as características ópticas da rede. Neste caso, o alcance depende de um série de factores, incluindo atenuação das fibras nos comprimentos de onda ascendente e descendente,

número de ONTs ligadas a cada OLT, número de níveis de distribuição, tipo de ficha nas extremidades da fibra, potência de saída dos transmissores e sensibilidade dos receptores utilizados.

- Número de clientes por repartidor

Os repartidores têm uma razão de divisão (*split ratios*) de 1:64, mas a antecipação de um *split ratio* de 1:128 esta a ser tomada em conta no protocolo MAC. Sendo assim, logo que os componentes ópticos permitam suportar esse elevado número de utilizadores, os produtos GPON definidos actualmente serão adaptados para o suporte desta evolução no número de ONTs/ONUs geridos por um único OLT.

- Gama de comprimentos de onda

O comprimento de onda de operação para fluxo descendente num sistema de fibra única está na faixa dos 1480-1500 nm, respeitando o G.983.3. Para um sistema com duas fibras o comprimento de onda de operação para sentido descendente usado deve situar-se na faixa 1260-1360 nm. O comprimento de onda para operação no sentido ascendente encontra-se na faixa 1260-1360 nm no que diz respeito a um sistema de uma ou duas fibras. A recomendação G.984.2 especifica também uma banda de comprimento de onda adicional sobre GPON que pode ser usada para *broadcast* de vídeo no sentido descendente, usando WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).

- Segurança

Devido á natureza *broadcast* da PON, esta arquitectura passiva pode sofrer de falta de privacidade, uma vez que cada ONT/ONU tem acesso a todos os dados no sentido descendente relativos aos outros. Para colmatar este problema de segurança, é necessário o uso de técnicas de encriptação do sinal.

A segurança pode ser implementada através de várias técnicas de encriptação, entre elas o AES (*Advanced Encryption Standard*) - para a encriptação da carga útil (*payload*) em que a chave de encriptação associada a cada ONT/ONU pode ser enviada em sentido ascendente, utilizando ligações ponto-a-ponto, tornando todo o tráfego

seguro pois nenhum ONT/ONU tem acesso ao tráfego no sentido ascendente proveniente de outros ONTs/ONUs na mesma PON.

O AES apenas permite a parametrização da chave em 128, 192, 256 bits, tornando a informação difícil de ser decifrada. A decifração é mudada, periodicamente, sem que o fluxo de informação seja perturbado.

- Correção de erros

A correção de erros - FEC (*Forward Error Correction*) é uma técnica matemática de processamento de sinal que codifica os dados para que os erros possam ser detectados e corrigidos.

Com esta técnica é adicionada informação redundante à informação original, no entanto, a quantidade de informação adicional é tão pequena que não introduz processamento em excesso (*overhead*). O FEC resulta num aumento do *link budget* de, aproximadamente, 3 a 4 dB. Como tal, débitos de transmissão mais elevados e distâncias superiores entre o OLT e o ONU podem ser suportados, bem como um número mais elevado de repartidores numa única árvore PON.

- Alocação dinâmica da largura de banda

A alocação dinâmica da largura de banda (DBA) é um método que permite ao utilizador a adopção rápida da largura de banda, tendo por base os requisitos de tráfego. O DBA é controlado pelo OLT, que aloca a largura de banda nos ONUs. É uma técnica que funciona apenas no tráfego no sentido ascendente pois no sentido descendente o tráfego é transmitido a todos os ONUs.

A alocação de largura de banda pode ser a mesma para todas as tramas tendo em conta uma alocação estática, ou diferente para cada trama como resposta a flutuações dinâmicas de tráfego. Esta última opção é a base da alocação dinâmica de largura de banda (DBA), que permite uma partilha dinâmica e eficiente de largura de banda para fluxo ascendente. Operando sobre o algoritmo de distribuição de largura de banda, o controlador MAC do OLT executa a atribuição de partes fixas e excedentes de largura de banda para as filas dos ONUs que queiram serviço. Este resultado é alcançado calculando o número de *time slots* para atribuição de largura de banda de fluxo ascendente para cada T-CONT, quer de acordo com os relatórios de estado T-

CONTs (*Transmission Containers*) dos ONTs/ONUs (*status reporting DBA*) ou baseado na monitorização dos fluxos de tráfego recebidos pelo OLT (*non-status-reporting DBA*). Quando é utilizado *status reporting DBA*, os relatórios de estado são enviados regularmente, incorporados nas transmissões de fluxo ascendente de modo a reflectir a quantidade de tráfego instantâneo à espera de largura de banda. São possíveis três modos de relatório de estado DBA: o primeiro é obrigatório enquanto os outros dois são opcionais. O “*Mode 0*” usa relatórios com bytes únicos para o comprimento do T-CONT. O “*Mode 1*” requer unidades de *policing* e/ou *shaping* no ONT/ONU, usa dois bytes para indicar a quantidade de dados com a taxa de picos dos tokens e com a taxa de sustentabilidade dos tokens. O “*Mode 2*” utiliza 4 bytes para indicar um sumário de todos os parâmetros dos vários tipos de T-CONTs de um ONT/ONU numa única mensagem. O MAC também tem em conta o SLA que assegura parâmetros QoS determinados pela atribuição de cada Alloc-ID a um dos cinco tipos T-CONT que seguem diferentes políticas de serviço. Após a execução do seu algoritmo MAC, o OLT coloca dentro do mapa de largura de banda do fluxo ascendente, os elementos, especificando a alocação de largura de banda.

Cada um destes elementos corresponde a um T-CONT e a um par de ponteiros *start-and-stop*, definindo o intervalo de tempo variável no qual os pacotes do Alloc-ID endereçados podem ser enviados no fluxo ascendente sem existir sobreposição com os outros. De seguida, como resposta às alocações de mapa de largura de banda do fluxo ascendente os blocos concedidos de cada T-CONT serão enviados no *burst* de tráfego no sentido ascendente.

A atribuição de largura de banda refere-se à distribuição de capacidade de tráfego ascendente PON entre as entidades de transporte de tráfego dos ONUs, usando um certo isolamento e critérios de equidade (fazendo o reconhecimento das diferenças e necessidades).

Na atribuição da largura de banda dinâmica as entidades transportadoras de tráfego são tidas em conta, sendo que a atribuição da largura de banda ocorre na escala de tempo das actualizações do DBRu (*Dynamic Bandwidth Report upstream*).

- Sincronização/*Ranging*

O uso de *framing* fixo a 125 μ s para o sinal no sentido descendente serve de base às relações de temporização em todo o sistema GPON. Na verdade, como o TDMA é usado no sentido ascendente e a distância entre o OLT e cada ONT/ONU varia, cada ONT/ONU necessita de ser sincronizado de modo a garantir um transporte sem colisões e criar uma temporização comum para o quadro do fluxo ascendente. Durante a activação e registo inicial, o OLT utiliza um procedimento chamado *ranging*, de modo a calcular o atraso apropriado que cada ONT/ONU deve inserir relativamente à trama recebida no sentido descendente, com o objectivo de sincronizar a fase do fluxo ascendente de todos os ONTs/ONUs na rede PON.

- Transmissão GPON

GPON utiliza o GEM como método de encapsulamento, em que o GEM fornece comunicação orientada a ligação (*connection-oriented*) e baseia-se numa versão ligeiramente modificada do método de envio de pacotes IP através de redes SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*).

No modo GEM, o operador possui ainda a escolha do transporte de tramas Ethernet ou TDM. Um “*GEM port*” é uma ligação bidireccional identificada pelo “*port ID*” e usada para o transporte de um fluxo de serviços de utilizador entre um ONT/ONU e o OLT. Todos os portos GEM são ligações bidireccionais ponto-a-ponto com a excepção de um porto GEM dedicado para o transporte de fluxo IPTV *multicast*, que é do tipo ponto-multiponto e tem apenas significado no sentido descendente.

No tráfego descendente a rede é partilhada e assim todos os ONUs conseguem escutar o tráfego que vai chegando á rede. A trama é composta pelo significado da mensagem do canal físico, usado por todos os ONUs e secções do *payload*. Na parte reservada para o *payload* o tráfego de dados e TDM são encapsulados usando o GEM. No GEM também se encontra informação quanto ao porto destino do ONU, fazendo com que cada porto seja visto pelo PON como uma identificação única, podendo ser suportado até 4095 identificações (TCP/UDP).

No tráfego ascendente os *slots* dentro das tramas, para cada ONU, são alocados, sendo o transporte feito com os T-CONTs (*Transmission Containers*)

conforme descrito em G.983.4. Esta entidade, identificada por um *alloc-ID* (identificador de alocação), é usada como unidade básica de controlo representando uma única fila de espera para o tráfego ascendente de um ONT/ONU que pode conter um ou vários portos GEM.

O GPON é encarado como sendo a norma que poderá dar origem a uma plataforma de acesso mais eficiente para os operadores poderem fornecer uma elevada largura de banda com garantias de qualidade de serviço (QoS) para todos os clientes.

2.5.3 Arquitectura GPON TDM (Multiplexagem por Divisão no Tempo)

- Tráfego descendente:

A funcionalidade de multiplexagem é centralizada, em que o OLT multiplexa os pacotes GEM no meio de transmissão usando os *GEM Port-ID*, para a identificação dos pacotes GEM que pertençam a diferentes ligações lógicas do fluxo descendente.

Por sua vez, cada ONU filtra os pacotes GEM de acordo com as identificações dos mesmos - IDs, processando apenas os pacotes GEM que lhe é correspondente.

Na Figura 31 incluiu-se os portos GEM que indicam a utilização da funcionalidade *multicast*.

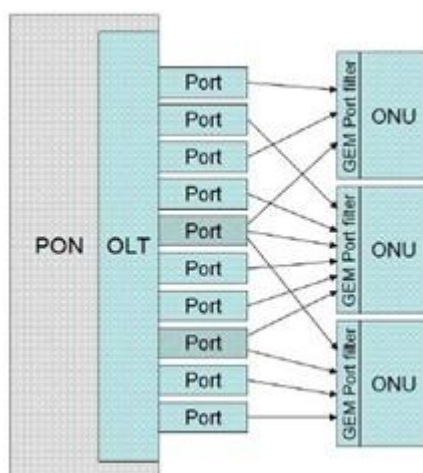


Figura 31 - GPON TDM, fluxo descendente. [16]

- Tráfego ascendente

No caso da Figura 32, a multiplexagem é distribuída, pois o OLT concede vagas de transmissão do fluxo ascendente às entidades transportadoras de tráfego dentro dos ONUs pertencentes à mesma PON.

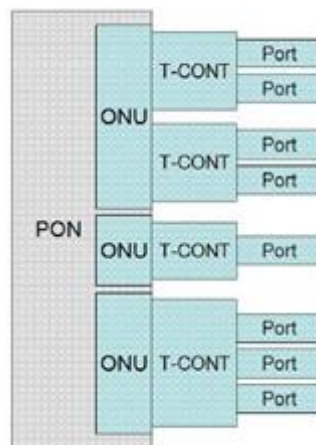


Figura 32 – GPON TDM, fluxo ascendente. [16]

- Identificador do ONU: ***ONU-ID***

É um identificador de 8 bits, atribuído a um ONU, pelo OLT, durante a activação do ONU, usando para isso o canal de mensagens PLOAM, sendo o único ID em toda a rede PON e mantendo-se válido até que o ONU seja desactivado pelo OLT, ou coloque a si mesmo no estado inactivo.

- Alocação do Identificador: ***Alloc-ID***

É um número de 12 bits que o OLT atribui a um ONU, para que assim possa o identificar durante uma transmissão.

2.5.4 Funcionalidades dos componentes de uma rede de acesso GPON

Como já referidos nesta dissertação, existem três componentes principais de uma rede de acesso GPON (além da própria fibra), o OLT, o CO, o ONU/ONT e o repartidor. O OLT é o “concentrador” da rede (é um dispositivo que permite concentrar todo o tráfego da rede e que provém de vários hóspedes), geralmente instalados numa Central (CO). O repartidor (ou repartidores) permite que uma única fibra do CO possa ser compartilhada entre um número de subscritores. O ONU/ONT serve uma única residência, fazendo a conversão de sinais ópticos em sinais eléctricos que podem ser usados dentro de casa/edifício.

2.5.4.1 GPON OLT

O OLT faz a gestão e controlo dos ONUs/ONTs ligados á rede PON.

No sentido descendente o fluxo do cliente é encapsulado com uma identificação correspondente – *tag ID* e só depois é transmitida; no sentido ascendente, faz-se a alocação de períodos específicos dentro do quadro para a transmissão do fluxo, respeitando o SLA (*Service Level Agreement*) e o relatório do DBR (*Dynamic Bandwidth Requirement*) dos ONUs/ONTs.

Para a gestão da rede, o OLT mede a potência recebida do ONU/ONT, aloca a identificação (Ids) ao ONU/ONT, descobre novos ONUs adicionados á rede e recolhe parâmetros de desempenho de cada um deles.

Assim como o ONT desempenha as funções de porto de utilizador – UPF (*User Port Function*) para a gestão, o OLT desempenha as funções de porto de serviço – SPF (*Service Port Function*) para os portos ligados a ele mesmo.

Na Figura 33 pode-se ver as funções dum OLT:

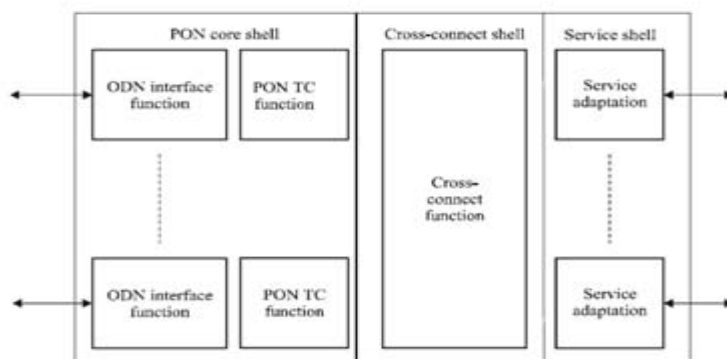


Figura 33 – Funções do GPON – OLT. [16]

2.5.4.2 GPON ONU/ONT

Os ONUs/ONTs são os nós do lado do subscritor que permitem a ligação entre os utilizadores e a rede.

O ONU adopta o tráfego que chega ao protocolo GPON, antes de o transmitir para o OLT, durante o período que lhe foi atribuído.

No sentido descendente os ONUs “escutam” continuamente todos os tráfegos da rede, extraíndo e encaminhando o que esteja destinado a um dos seus portos. Visto que o ONU normalmente se encontra dentro da casa/instalações do cliente, o mesmo terá de ser sensível aos custos. Os ONUs/ONTs actuam como nós “escravos” (*slaves*), na maioria dos cenários PON, sendo controlados pelo gestor da rede através do OLT. Enquanto o ONT fornece as funções de porto do utilizador exigidas pelo cliente em FTTH (cliente residencial), o ONU não faz o mesmo e em vez disso fornece a interface para o meio de transporte padrão, como o E1/T1, Ethernet, xDSL.

A função UPF do porto do cliente é responsável pelo fornecimento dos processos de interfaces, necessários aos utilizadores finais que se ligam ao ONU permitindo-lhes o acesso ao sistema de rede. Um ONT é considerado parte do CPE (*Costumer-Premises Equipment*), enquanto o ONU suporta o tráfego por mais de um CPEs, sendo em alguns casos considerado uma parte da rede do operador.

Na Figura 34 pode-se ver as funções dum ONU.

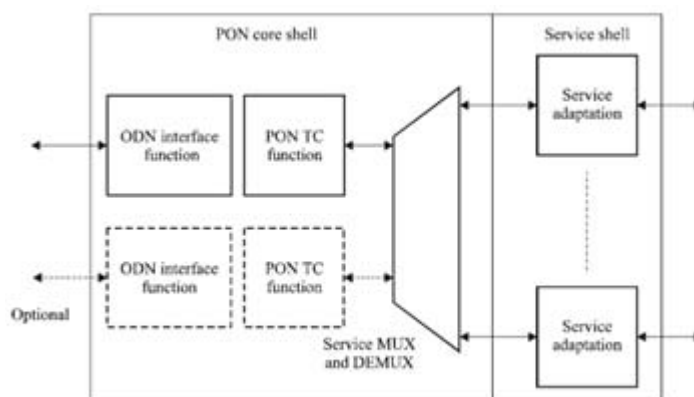


Figura 34 – Funções do GPON – ONU. [16]

2.5.4.3 Repartidor óptico

Tipicamente, uma PON interliga o OLT aos múltiplos ONUs. A ligação ponto-a-multiponto entre o OLT e os múltiplos ONUs é conseguida através da utilização de um ou mais repartidores (*splitters*) ópticos.

Estes dispositivos têm um *split ratio* de 1:N (N =2, 4, 8, etc.) e a potência óptica é dividida, igualmente, entre as saídas.

A potência em cada porto de saída é reduzida, relativamente à entrada e é dada pela seguinte equação:

$$P_{\text{porto}} = (P - \Delta) - 10 \log_{10} N \quad (10)$$

em que, P é a potência de entrada do impulso, Δ a perda do sinal no acoplador e N o número de portos de saída.

Existem duas técnicas de fabrico de repartidor:

- FST (*Fused Biconical Taper*);
- PLC (*Planar Lightwave Circuit*).

Um repartidor 1x2 FBT é feito através da fusão de duas fibras. Para se conseguirem taxas de divisão (*split ratios*) mais elevadas, colocam-se vários repartidores 1x2 em cascata. Um repartidor PLC consiste num circuito óptico microscópico, geralmente feito de silício.

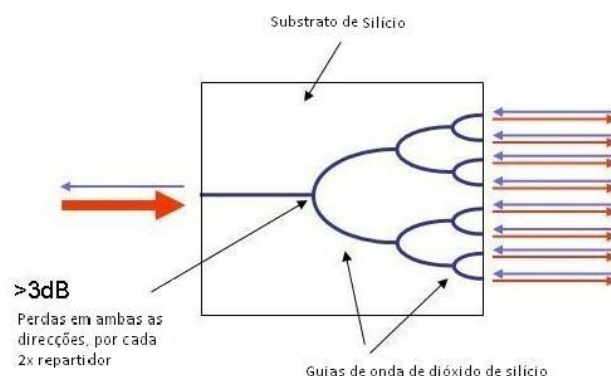


Figura 35 – Circuito de um Repartidor PLC (*Planar Lightwave Circuit*). [17]

Considere-se agora um esboço do anteprojecto de uma solução NGN (*Next Generation Network*), feito na cidade de Aveiro [18]:

A cidade de Aveiro tem uma área de aproximadamente 15km². Estima-se que nesta área, a densidade populacional ronda os 70000 habitantes. Por isso, fazendo os cálculos, concluímos que existem 3.5 habitantes por residência, o que perfaz um total de 20000 residências. Numa PON há vários factores a ter em conta, sendo um desses factores a distância entre um OLT e o ONU. Considerando que a cada OLT podem estar ligados no máximo 64 *assinantes* (*split ratio* 1:64) e que cada ligação tem um *link budget* de 28dB a distância máxima entre um OLT e um ONU é de 20km. Considerando estes dois pontos:

1- Distância entre o OLT e o repartidor óptico igual a 19km. Permite servir uma área com 1km de raio que é a situação ideal para zonas com densidade populacional elevada.

2- Distância entre o OLT e o repartidor óptico igual a 10km, permite servir uma área com raio de 10km que é a melhor solução para zonas com densidade populacional inferior.

A melhor solução a implementar para a cidade de Aveiro seria um anel de fibra óptica no qual se estabeleciam ligações em árvore, provenientes dos repartidores.

A Central ficaria situada na Universidade de Aveiro, por exemplo, em instalação anexa ao IT (Instituto de Telecomunicações). Quanto à arquitectura FTTx a ser implementada no terreno, pensamos que em zonas residenciais fortemente populadas a solução FTTB ou FTTCab seriam as mais indicadas, pois o volume financeiro para instalação de fibra óptica no terreno até a um armário de rua seria economicamente mais viável do que implementar uma solução FTTH pois em edifícios antigos seria difícil levar fibra até casa. No entanto, a solução FTTH seria boa para implementar no terreno em todas as obras futuras feitas no município de Aveiro, pois já existe uma tecnologia pronta a ser implementada no terreno onde todos os edifícios ou urbanizações a serem construídos teriam já instalação para fibra óptica até casa do cliente final (FTTH).

2.6 Normas de Comunicação Óptica

Normalmente, quando as pessoas se deslocam entre países, precisam de adaptadores eléctricos, que convertam a tensão e as configurações de ligação dos seus aparelhos de acordo com as configurações adoptadas em cada país. Esta questão tornou a interoperabilidade e a compatibilidade entre equipamentos de diferentes fornecedores num dos muitos factores relevantes a ter-se em consideração. Por esse motivo foram criadas comissões que discutem questões tais como o desempenho e a confiabilidade de componentes activos e de sistemas tais como: transmissores, receptores, moduladores e amplificadores. Estes sistemas englobam sistemas monomodo digitais e analógicos, sistemas multimodo ponto-a-ponto, aplicações em redes locais (LAN) e sistemas ópticos amplificados com Multiplexagem por Divisão de Comprimento de Onda Densa (DWDM).

Existem três classes básicas de normas para a fibra óptica: as normas primárias, as normas para testes de componentes e as normas de sistema.

2.6.1 Normas Primárias

São as normas referentes à avaliação e caracterização de parâmetros físicos fundamentais tais como atenuação, largura de banda, as características operacionais de fibras e os níveis de potência óptica assim como larguras espectrais. Nos Estados Unidos, a principal organização envolvida nas normas primárias é o NIST (*National Institute of Standards and Technology*), que normaliza laser e da fibra óptica e que patrocina uma conferência anual sobre medidas de fibras ópticas. Outro objectivo desta organização é apoiar e acelerar o desenvolvimento de tecnologias emergentes

Existem outras organizações internacionais, tais como o NPL (*National Physical Laboratory*) no Reino Unido e o PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) na Alemanha.

2.6.2 Normas para Testes de Componentes

São as normas relevantes para definir testes de desempenho de componentes de fibra óptica e para estabelecer procedimentos de calibração de equipamentos. Existem várias organizações envolvidas na formulação destas normas de teste, nomeadamente a TIA - *Telecommunication Industries Association*, em associação com a EIA - *Electronic Industries Association*, o Sector de Normalização do ITU-T - *International Telecommunication Union* e o IEC - *International Electrotechnical Commission*.

A TIA tem uma lista de mais de 120 normas de teste de fibra óptica e especificações sob a designação geral TIA/EIA-455-XX-YY, onde XX refere-se a uma técnica de medida específica e YY refere-se ao ano da publicação.

Estes padrões são também chamados de FOTPs - *Fiber Optic Test Procedures*, pelo que TIA/EIA-455-XX se torna FOTP-XX, incluindo uma variedade de métodos recomendados para testar a resposta das fibras, cabos, dispositivos passivos e componentes electro-ópticos, levando em conta os factores ambientais e condições operacionais. Por exemplo, TIA/EIA-455-60-A-1997, ou FOTP-60 é um método publicado em 1997 para medir o comprimento da fibra ou do cabo, usando um OTDR - *Optical Time-Domain Reflectometer* – instrumento que mede a atenuação, o comprimento, perdas no conector e os níveis de reflectância, ajudando a localizar as quebras de fibra.

2.6.3 Normas de Sistema

Estas normas referem-se a métodos de medida de ligações e de redes, sendo as organizações envolvidas a ANSI - *American National Standards Institute*, o IEEE - *Electrical and Electronic Engineers* e o ITU-T. Dentro da TIA, o Comité FO-2 desenvolve os procedimentos de teste da camada física, guias do projecto do sistema e as especificações do sistema para ajudar tanto os fornecedores como os utilizadores da tecnologia de comunicações com fibra óptica.

De particular interesse para os sistemas com fibra óptica são as normas de teste e as recomendações do ITU-T, que são destinadas a todos os aspectos das redes ópticas.

Dentro da série G (do número G.650 a G.975) há recomendações relativas a cabos de fibra, à confiabilidade do sistema e disponibilidade, amplificadores ópticos, multiplexagem de comprimento de onda, redes de transporte ópticas (OTNs) e gestão e controle para redes ópticas passivas (PONs).

Na série G.984, temos os seguintes factores chave:

- Método de encapsulamento do GPON, GEM para o transporte de Ethernet, ATM e TDM sobre uma rede PON, numa topologia ponto-multiponto, com largura de banda de 1,25 Gbps sentido ascendente e 2,5 Gbps descendente;
- Mecanismos de Operações, Administração e Manutenção (OAM) da rede;
- Operações de classe de serviço (CoS) do conteúdo de dados que sejam sensíveis ao tempo de transporte;
- Suporte TDM, utilizando os serviços de emulação de circuitos, ou de transporte usando GEM e suporta serviços de voz, com voz sobre IP (VoIP).

Na tabela seguinte encontram-se algumas recomendações *do ITU-T*, para sistemas e redes ópticas.

Tabela 6 - Recomendações ITU-T para Redes e Ligações Ópticas

Recomendações	Título
G. 650 to G.655	Definitions, test methods, and characteristics of various types of multimode and single-mode fibers
G.662	Generic Characteristics of Optical Amplifier Devices and Subsystems
G.671	Transmission Characteristics of Optical Components and Subsystems
G.709	Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)
G.872	Architecture of Optical Transport Networks
G.874	Management Aspects of the Optical Transport Network Element
G.959.1	Optical Transport Network Physical Layer Interfaces
G.694.1	Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid
G.694.2	Spectral Grids for WDM Applications: CWDM Wavelength Grid
G.975	Forward Error Correction for Submarine Systems
G.984.1	Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics
G. 984.2	Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification
G. 984.3	Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification
G. 984.4	Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): ONT management and control interface specification
G. 984.5	Enhancement band for gigabit capable optical access networks
G. 984.6	Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension
G.985	100 Mbit/s point-to-point Ethernet based optical access system

Capítulo 3 - Caso de estudo

3.1 Canal de Transmissão (Tx)/ Recepção (Rx)

Neste capítulo pretendemos simular dois sistemas de transmissão ópticos básicos, com 1 e 32 clientes, para posteriormente fazer a comparação tendo em conta as especificações do meio físico, o alcance e o balanço de potência dos mesmos. Fazemos também uma pequena abordagem sobre as vantagens da utilização da funcionalidade *multicast* no cenário FTTH/GPON.

As redes ópticas passivas dos tipos FTTH e FTTB utilizam apenas dispositivos passivos entre a Central e as instalações do utilizador. Estes dispositivos são basicamente repartidores ópticos de potência. A rede de repartidores é denominada ODN (*Optical Distribution Network*).

A vantagem da utilização de repartidores passivos é evitar a necessidade de instalação de uma fibra para cada utilizador desde o OLT, reduzindo os custos referentes às fibras ao longo de parte da distância. Os sinais para um certo conjunto de utilizadores seguem numa única fibra até o local onde é necessário distribuir estes sinais, isto é, próximo das instalações do utilizador. Nesta localização, o repartidor pode estar condicionado numa caixa ou num armário.

As ODNs são transparentes ao débito, aos formatos de modulação e ao protocolo (SDH, ATM, Ethernet). Essa característica permite a combinação de serviços e facilita a actualização destas redes, tanto no que diz respeito ao aumento do débito, ao número de utilizadores e de serviços.

Ao contrário das outras tecnologias de acesso, a largura de banda entregue pelas redes ópticas passivas é praticamente independente da distância, o que permite um alcance relativamente grande.

O estudo descrito nesta secção é baseado num sistema de comunicação composto por um transmissor, fibra óptica, um atenuador e receptores:

- **Transmissor** - LED ou díodo laser
- **Fibra monomodo**
- **Receptor** - Fotodíodo PIN ou APD

De seguida falaremos de forma abrangente sobre cada um dos componentes do sistema. A fibra óptica foi abordada no Capítulo 1.

3.1.1 Transmissores ópticos

O transmissor, conforme se pode ver na Figura 36, pode ser um “bloco” simples e barato baseado em LEDs, que se encaixa numa placa de circuito para ligações de curta distância, ou um módulo caro baseado em lasers contendo componentes electrónicos sofisticados para controlar a temperatura, a estabilidade de comprimento do onda e o nível da potência de saída óptica do diodo laser. O mesmo fornece um outro bloco, de menor dimensão, de montagem da fonte de luz, um suporte para a fixação da luz acoplada da fibra, um meio para manter a temperatura a um valor fixo e controlos electrónicos diversos. Em alguns casos, esse volume também contém um transmissor modulador externo para aplicações de velocidade muito elevada.

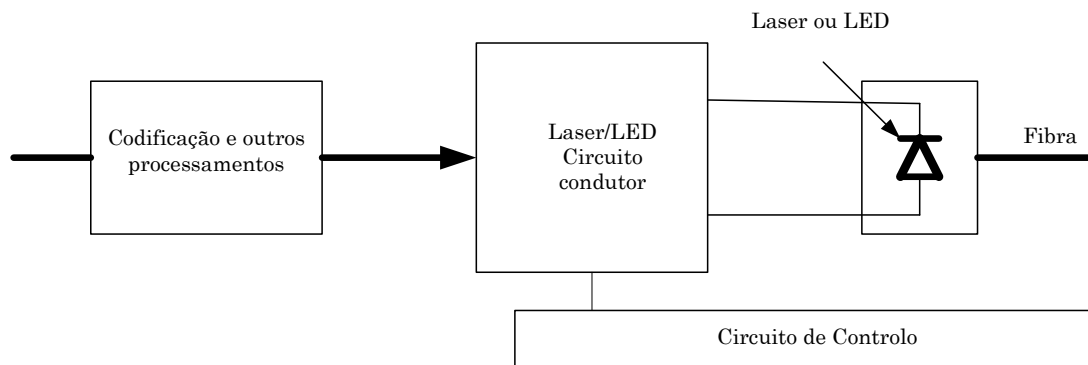


Figura 36 – Transmissor óptico

3.1.1.1 Foto-emissores

Os foto-emissores são os LEDs e os LASERs:

Transmissores LED

A saída de baixa potência (tipicamente -16 dBm acoplado numa fibra de 62.5µm) e as características do tempo de resposta lenta de um LED, em comparação com um diodo laser, limitam o seu uso a curta distância e em aplicações de baixa velocidade (até 200 Mbps sobre poucos km) que utilizam fibras multimodo. Para a utilização numa rede local, um transmissor LED muitas vezes está contida no mesmo pacote físico que o receptor correspondente, pelo que esta configuração permite uma

forma simples, barata e conveniente de fazer a interface entre uma placa de circuito impresso (PCB) e uma fibra óptica.

Um transmissor típico LED irá conter uma superfície InGaAsP de 1310 nm emitindo LED, e um circuito controlador para a fonte. Esses transmissores utilizam uma única fonte de alimentação 3.3V e opera numa escala de temperatura padrão de 0° a 70°C, ou, opcionalmente, (para um dispositivo mais caro) num intervalo de 40 ° a 85°C.

Transmissores LASER

Uma vez que o comprimento de onda de um laser tem desvios de cerca de 0,1nm /°C e porque a eficiência da saída muda com a temperatura um método padrão de estabilização desses parâmetros é a utilização de um refrigerador termoelétrico (*thermoelectric cooler*) em miniatura, que utiliza um sensor de temperatura e um controlador electrónico para manter o laser a uma temperatura constante. Além disso, normalmente, é um foto-diodo no módulo que monitoriza o nível de potência óptica emitida pelo laser, uma vez que este nível pode mudar com factores como a tempo ou a tensão de polarização.

O módulo também pode conter um segundo foto-diodo, precisamente para acompanhar a saída de pico de comprimento de onda.

3.1.2 Receptores ópticos

No final de uma ligação de transmissão óptica deve haver um receptor, cuja função é interpretar as informações contidas no sinal óptico. Um receptor óptico consiste num fotodetector e equipamentos electrónicos de amplificação e processamento do sinal. No processo de conversão do sinal óptico de energia proveniente do extremo da fibra óptica para um sinal eléctrico, vários ruídos e distorções serão inevitavelmente introduzidos devido às respostas imperfeitas dos componentes.

Isso pode levar a erros de interpretação do sinal recebido. O critério mais significativo para medir o desempenho de um sistema de comunicação digital é a probabilidade de erro média (*average error probability*). Num sistema analógico o

critério utilizado é geralmente especificado em termos do pico de sinal-ruído SNR (*signal-to-noise ratio*).

O cálculo da probabilidade de erro para um receptor óptica de comunicação digital é diferente da sua parte electrónica. Este é um resultado da natureza quântica discreta do sinal óptico e também por causa do carácter probabilístico do processo de ganho quando um foto-diodo avalanche é utilizado.

3.1.2.1 Fotodetectores

Foto-diodo PIN

O primeiro elemento do receptor é uma célula em que o fotodetector sente o sinal de luz caindo sobre ele e converte a variação da potência óptica para uma variação da corrente eléctrica correspondente.

Uma vez que o sinal óptico em geral está enfraquecido e distorcido quando emerge do extremo da fibra, o fotodetector deve satisfazer alguns requisitos rigorosos de desempenho, entre os quais:

- A alta sensibilidade para a emissão de comprimentos de onda do sinal de luz recebida;
- Um acréscimo mínimo de ruído ao sinal;
- A velocidade de resposta rápida para lidar com a taxa de dados desejada.

Além disso, o fotodetector precisa:

- Ser insensível a variações de temperatura;
- Ser compatível com as dimensões físicas da fibra;
- Ter um custo razoável comparado ao de outros componentes do sistema;
- Ter uma vida operacional longa.

Foto-diodo Avalanche

Um foto-diodo de avalanche (APD) a nível interno multiplica o sinal foto-corrente primário antes do mesmo entrar no circuito de entrada do amplificador seguinte. O efeito de multiplicação é obtido através da aplicação de um campo eléctrico muito elevado em todo o foto-diodo. Quando um electrão gerado pelo fóton encontra esse campo eléctrico elevado, ele pode adquirir energia suficiente para “chutar” mais electrões da banda de valência para a banda de condução, criando pares secundários electrão-lacuna. Estes pares secundários também são acelerados a energias mais elevadas e, portanto, pode gerar ainda mais pares electrão -buraco. Isso aumenta a sensibilidade do receptor uma vez que a foto-corrente é multiplicada antes de encontrar o ruído eléctrico associado ao circuito receptor. O processo é chamado de multiplicação avalanche e portanto, o dispositivo é chamado de um fotodiodo avalanche.

3.1.3 Especificações do meio físico – Camada de Convergência de Transmissão (G.984.2)

Embora as outras camadas sejam compostas por software, esta pelo contrário é composta por hardware, sendo o mesmo definido segundo as especificações para a camada física de acordo com a norma G.984.2:

- Débito (*Bit rate*) nominal: 1.244Gbps ou 2.488Gbps no descendente, e 155.52Mbps, 622.08Mbps, 1.244Gbps ou 2.488Gbps no sentido ascendente;
- Comprimentos de onda: 1260 a 1360 nm no sentido ascendente, e 1480 a 1550nm no sentido descendente;
- Tráfego: apenas digital;
- Número de ONUs: até 128, limitado pela atenuação do ODN;
- Máxima atenuação entre ONUs: -15dB;
- BER máximo: 10^{-10}

- Valores de potência e sensibilidade de transmissores e receptores classe A, B e C, para o fluxo descendente de 2.488Gbps, segundo ITU-T G.984.3 [5]:

Tabela 7 - Potência inicial, no caso de se ter uma fibra e 2.488Gbps, fluxo descendente

	Classe A	Classe B	Classe C
Potência inicial (dBm)	0 a +4	+5 a +9	+3 a +7
Sensibilidade (dBm)	-21/-1	-21/-1	-28/-8 (receptor APD)

- Valores para a sensibilidade de receptores que operam a 1550nm@ BER = 10^{-10} :

Tabela 8 - Valores normalizados da sensibilidade e sobrecarga dos detectores, APD e PIN

Débitos	Tipo	Sensibilidade (dBm)	Sobrecarga (dBm)
2.5 Gbps	APD	-34	-8
10 Gbps	PIN	-20	0

Sobrecarga: valor máximo de potência óptica de entrada;

Gama dinâmica: diferença entre a sobrecarga e sensibilidade.

- Valores de potência e sensibilidade de transmissores e receptores classe A, B e C, para o fluxo **ascendente** de 1.244Gbps, segundo ITU-T G.984.3:

Tabela 9 - Potência inicial, no caso de se ter uma fibra e 1.244Gbps, fluxo ascendente

	Classe A	Classe B	Classe C
Potência inicial (dBm)	-3 a +2	-2 a +3	+2 a +7
Sensibilidade (dBm)	-24	-28	-29

- A máxima atenuação permitida entre o OLT e o ONU é descrita na tabela seguinte ITU-T G.984.3:

Tabela 10 - Atenuação permitida entre o OLT e o ONU

	Classe A	Classe B	Classe C
Perda mínima (dB)	5	10	15
Perda máxima (dB)	20	25	30

3.2 Cenário de aplicação Tx/Rx: GPON/FTTH

4.2.1 Funcionalidade *Multicast*

Os sistemas de acesso GPON são baseados em transmissão P2MP (point-to-multipoint) e por isso são capazes de suportar o tráfego *Multicast* (mesmo que praticamente todos os fornecedores de equipamentos incluam a funcionalidade *multicast*). Por exemplo, uma única cópia de um canal vídeo *multicast* pode ser entregue ao OLT, que por sua vez faz o seu encaminhamento a todos os ONU da PON.

A grande vantagem do GPON sobre o xDSL é a capacidade de fornecer maior velocidade de acesso aos utilizadores finais, pelo que várias ofertas de serviços podem explorar esse aumento da velocidade, mas um dos grandes benefícios é a capacidade de entregar simultaneamente múltiplos canais de HDTV (*High Definition TV*). Essa centralização do serviço *multicast* tem um impacto directo no custo-benefício das funcionalidades *multicast* na rede, sendo que no futuro espera-se suportar, com a tecnologia GPON mais de 2048 ONUs/ONTs por PON. [6]

Se o produto GPON incluir as condições básicas para suportar *multicast*, então poderá ser viável entregar um único exemplar dum canal *multicast* ao OLT e tê-lo replicado para todos os ONUs/ONTs, pois caso isso não seja possível teriam de ser entregue várias cópias do canal ao OLT (um para cada cliente que tenha pedido o serviço) e o OLT por sua vez utilizaria técnicas *unicast* para entregar uma cópia aos respectivos clientes. Esta última forma de transmissão não é de todo eficiente, tendo em conta o percurso de transmissão OLT – ONU, visto que:

- Em primeiro lugar, a rede que liga o OLT ao ONU teria de transportar múltiplas cópias *unicast* do canal pretendido, em vez de uma única cópia;
- Em segundo lugar, o próprio sistema GPON precisaria transportar múltiplas versões *unicast* do canal, o que resultaria numa utilização ineficiente da capacidade da fibra, isto entre o OLT e o repartidor óptico passivo (*splitter*).
- Finalmente, sendo a tecnologia de acesso GPON também usada para servir blocos residências, ou edifícios MTU (*Multi-Tenancy Unit*), a réplica *multicast* dentro dum multi-porto ONU poderá dar maior eficiência.

Vejamos um exemplo prático.

Se numa rede GPON, 20 clientes desejarem ver o mesmo filme, codificados a 10Mbps para qualidade HD (*High Definition*), no cenário *multicast* apenas seriam necessários os 10Mbps da largura de banda da rede. Por outro lado, sem *multicast* activo seriam necessários 20 canais *unicast* em paralelo, exigindo assim, 200Mbps (20x10Mbps).

Considere-se agora algumas características gerais e objectivos da transmissão em *Multicast*.

Características:

- Dados enviada uma única vez através de uma ligação;
- O destino é sempre um grupo;
- Reencaminhamento de pacotes/dados desnecessário.

Objectivos:

- Economizar os recursos da rede (Largura de banda)
- Diminuir o tempo de resposta do *switch*, devido ao atraso de comunicação ponto-a-ponto.
- Boa escalabilidade.

3.2.2 Simulação e discussão dos resultados

Apresenta-se o esquema do sistema estudado usando o simulador de sistemas de comunicações ópticas OSIP, para um utilizador:

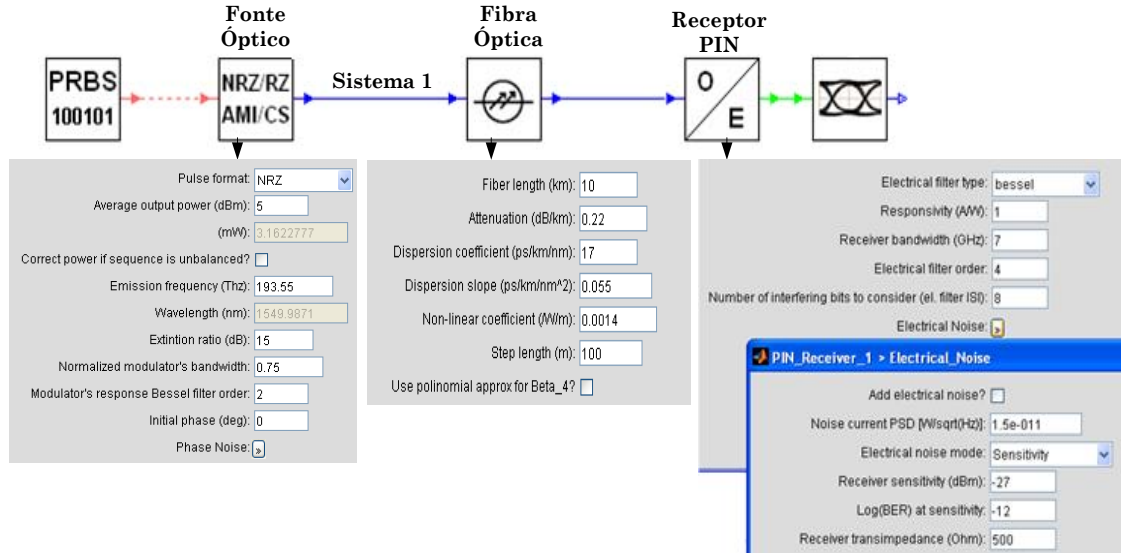


Figura 37 – Esquema do sistema GPON simulado para um único utilizador.

Apresenta-se agora o esquema do sistema estudado, para 32 utilizadores:

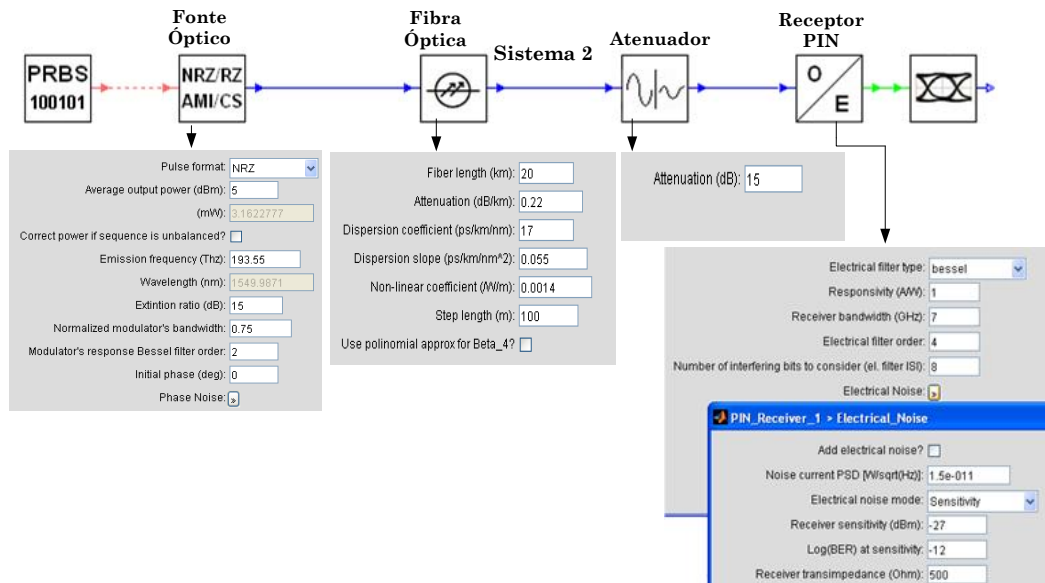


Figura 38 - Esquema do sistema GPON simulado para 32 utilizadores.

Os requisitos do sistema são:

- A ligação ponto-a-multiponto;
- O alcance máximo da ligação;
- Ritmo binário;
- Taxa de erros binária (BER típica: 10^{-12});
- Número de ONUs: 1 e 32.

Considerando os sistemas da Figura 37 e da Figura 38, fizeram-se as análises para vários cenários, com os respectivos diagramas de olho (a) a d)), tendo em conta o tráfego em **sentido descendente** com um débito de **2.488Gbps** e com comprimento de onda de **$\lambda = 1550\text{nm}$** .

- Transmissão para um único utilizador, considerando apenas a dispersão, atenuação e as não-linearidades numa fibra monomodo de 10km;
- Transmissão para 32 utilizadores, considerando a dispersão, a atenuação e as não-linearidades numa fibra monomodo de 10km;
- Transmissão para um único utilizador, considerando a dispersão, a atenuação e as não-linearidades numa fibra monomodo de 20km;
- Transmissão para 32 utilizadores, considerando a dispersão, a atenuação e as não-linearidades numa fibra monomodo de 20km.

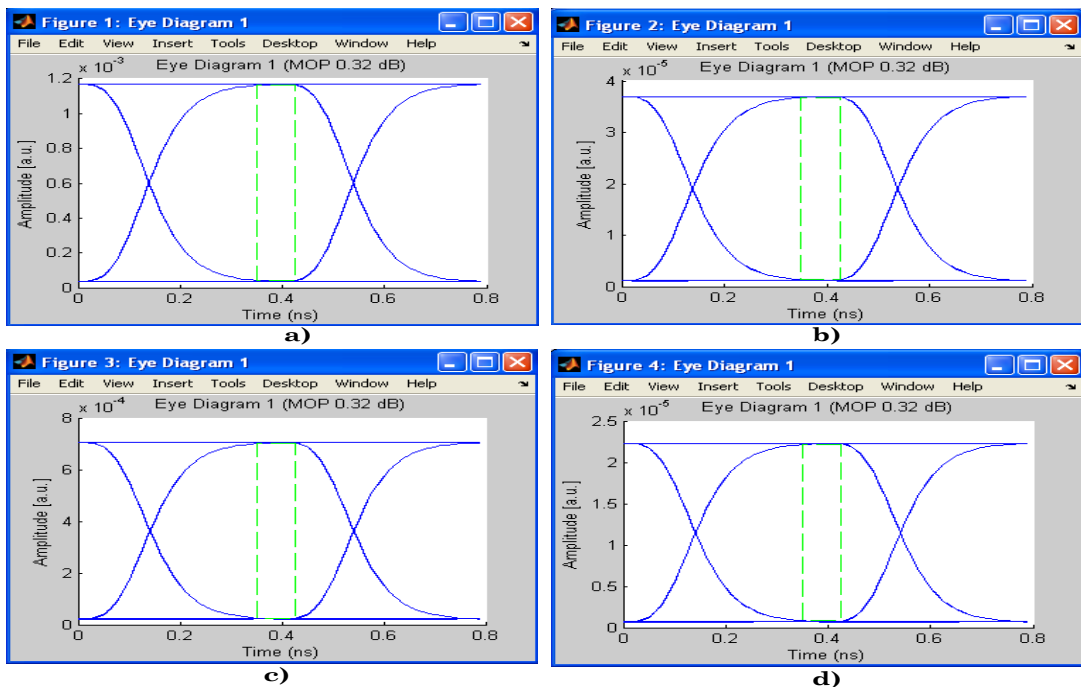


Figura 39 - Diagrama de olho da transmissão do tráfego descendente: a) 1 utilizador, fibra de 10km; b) 32 utilizadores, fibra de 10km; c) 1 utilizador, fibra de 20km; d) 32 utilizador, fibra de 20km;

Estudámos a transmissão num sistema GPON bidireccional, numa única fibra monomodo, sendo o comprimento de onda do canal descendente de 1550 nm e o comprimento de onda do canal ascendente de 1310 nm. No entanto, concentrámo-nos somente no tráfego descendente, com um emissor da classe C e fizemos a análise para o pior caso. Considerando que a sensibilidade do receptor PIN é de -27dBm, obtivemos um balanço de potências de:

$$L_B = (P_0) - (P_s) = (+5) - (-27) = 32dB \quad (11)$$

em que P_s é sensibilidade do receptor e P_0 a potência de saída do transmissor. O alcance físico máximo obtido é de:

$$A_B = \frac{L_B - P - P_C}{O_L} = \frac{32 - 15 - 2}{0.22} = 68km \quad (12)$$

em que P é a perda devido ao atenuador para 32 utilizadores, P_C o valor assumido para perdas no conector e O_L representa as perdas, tendo-se assumido o valor 0.22dB/km.

A fibra usada inclui as não-linearidades bem como a dispersão e a atenuação e como se pode ver pelos diagramas de olho de a) a d), há uma diminuição drástica da amplitude do sinal transmitido a partir do momento que se passa de um para os 32 utilizadores (b) e d)), como já seria de se esperar. Isto deve-se ao facto de que, para além da dispersão, da atenuação, das não-linearidades e do comprimento da fibra (20 km) se ter uma atenuação de 3dB por cada 2 utilizadores no atenuador usado, perfazendo um total de 15dB para os 32 utilizadores.

Obtivemos no caso de 32 clientes o alcance de 68km, devendo-se ao facto de não se ter utilizado mais elementos no canal de transmissão (moduladores, amplificadores, acopladores, etc) que também incluiriam dB de perdas. Sabe-se que a limitação física do alcance da rede, teoricamente de 20km, está relacionada com as características ópticas da rede, dependendo da atenuação da fibra no tráfego ascendente e descendente, da potência de saída do transmissor, da sensibilidade do receptor usado e do número de ONUs ligado ao OLT. O alcance físico da rede diminuiu com o aumento do número de clientes, tendo-se perdas/km, pois tem-se o dobro de

utilizadores na rede por cada decréscimo de 3dBm, devendo-se também às perdas dos dispositivos com grande quantidade de número de portos de saída (no caso de se ter um edifício).

Pelas especificações da norma G984.2 do ITU-T, também se poderá concluir que os transmissores de classes A e B, apresentando menor custo do que os de classe C são os mais adequados para as redes GPON com poucos utilizadores ou com alcance reduzido; por sua vez, os transmissores de classe C embora sejam dispendiosos, permitem atingir mais utilizadores e um maior alcance.

3.2.3 Possível optimização do cenário simulado

Uma solução para o aumento do alcance da rede GPON poderá passar por:

- ❖ Introduzir amplificadores ópticos de grande desempenho;
- ❖ Inserir DCMs (*Dispersion-compensating Module*), dispositivo com dispersão oposta à da fibra sendo usada, ou DCF (*Dispersion Compensating Fiber*)
- ❖ Utilizar modulação externa; melhorar (diminuindo) a sensibilidade do receptor.

Neste capítulo e dissertação foi seleccionada a tecnologia GPON pois tem várias vantagens, tais como a maior largura de banda, maior eficiência na utilização da banda, e especialmente pela sua compatibilidade com TDM, dado que ainda hoje, grande parte do mercado para esta tecnologia é representada pelas operadoras de telecomunicações, apropriando-se da herança das redes SDH.

Capítulo 4 - Proposta de Implementação de Mecanismo *Multicast* no OLT PON, usando o Virtex 5

Neste capítulo pretendemos fazer a implementação de mecanismo *multicast* no dispositivo que se encontra do lado da Central, o OLT PON, usando a família Virtex 5 de FPGAs.

4.1 Broadband Fórum/ WT-156 - Acesso GPON no contexto do TR-101

Em Abril de 2006, o TR-101 - "Migration to Ethernet Access Aggregation", abriu caminho para a substituição da agregação do acesso ATM por uma arquitectura baseada em Ethernet, que se tornou um padrão global para implementações do serviço *triple-play* para os clientes residenciais e empresariais que usam o xDSL, como a tecnologia de acesso à banda larga.

Actualmente, muitas especificações da arquitectura do TR-101 estão a ser amplamente utilizadas com outras tecnologias de acesso, especialmente, FTTx / PON. O relatório técnico TR - 156 utiliza o acesso GPON no contexto do TR – 101, vem reforçar essas especificações quando aplicado a GPON fornecendo requisitos mais detalhados e específicos. De forma a reduzir a complexidade operacional e maximizar a interoperabilidade dos equipamentos, um subconjunto de combinações de configuração flexíveis do GPON são especificados no TR - 156 para facilitar a aplicação das opções de arquitectura VLAN do TR-101. Outras secções dessa especificação permitem às operadoras tirar partido das capacidades do GPON e garantir uma melhor integração do GPON em redes de banda larga tradicionais.

4.2 Broadband Fórum/ WT-156 § 5.3 IGMP Controlled Multicast. [19]

Existem algumas considerações exclusivas para a implantação de serviços de multicast na rede GPON, tais como:

- **Topologia Ponto-a-Multiponto:** a rede de distribuição óptica GPON é uma rede física ponto-a-multiponto, o que significa que os dados enviados pelo OLT,

no sentido descendente são transmitidos para todos na camada óptica, sendo recebido por todos os ONUs. Mas no sentido ascendente, o tráfego enviado por qualquer ONU é recebido pelo OLT (fazendo uso dos mecanismos de transmissão *unicast*).

- **Largura de banda:** a tecnologia GPON suporta significativamente mais largura de banda dos subscritores do que o xDSL, em que os ganhos de largura de banda devido à funcionalidade *multicast* salientam ainda mais essa diferença.
- **Hierarquia de replicação da informação:** a hierarquia das réplicas *multicast* poderá ser mais profunda na rede física, primeiro devido à replicação entre OLT - ONU e segundo devido à possibilidade de existir mais réplicas, caso tratar-se dum ONU MDU (edifícios, prédios com várias instalações).
- **Escala:** os pontos referidos anteriormente mostram como um único OLT se adequa bem para ao tráfego *multicast*, principalmente em relação ao acesso a outros nós. Os OLTs do GPON podem suportar milhares de ONUs, e dezenas de milhares de *hosts* (STBs) adicionais, e todos eles sustentados a partir de um único interface V. Por isso, este factor requer maior atenção no que diz respeito à escalabilidade da rede de acesso.

Segundo a secção 5.3 do *Broadband Fórum/ WT-156*, os requisitos *multicast* específicos do GPON no **plano de dados** são:

- R-1** O tráfego *multicast*, constituído por um conjunto de grupos multicast e mensagens IGMP no fluxo descendente é transmitido através de um ou mais *N: 1 VLANs* (Virtual LANs), usando portos GEM *unicast* bidireccionais;
- R-2** O tráfego *multicast* VLAN exigido por todos os ONUs é transportado no fluxo descendente usando o porto GEM *Multicast*;
- R-3** O porto GEM *Multicast* é unidireccional (no fluxo descendente). A criptografia AES do GPON está desactivada;
- R-4** O porto GEM é unidireccional, pelo que o controlo de fluxo ascendente utiliza o porto de dados GEM bidireccional existente com um TC (*Traffic Container*) apropriado.

Os requisitos *multicast* específicos do GPON no **plano de controlo** requerem que todas as mensagens IGMP no fluxo descendente sejam transportadas dentro de suas VLANs *multicast*. No caso em que um bridge *multicast* é usado na ONU, a mensagem é selectivamente inundada na direcção dos portos dos clientes pertencentes à mesma VLAN *multicast*. Todas as mensagens IGMP no fluxo ascendente são “escutadas” pela ONU antes de serem encaminhadas. São necessárias funções de classificações adicionais para suportar o mapeamento de grupos *multicast* para VLANs *multicast* para assim suportar múltiplas VLANs *multicast*.

A configuração do OMCI (*ONU Management Control Interface*) divide o tráfego *multicast* do fluxo descendente do tráfego *multicast* no fluxo ascendente, principalmente, devido à natureza unidireccional do porto de *multicast* GEM no fluxo descendente e para evitar inundações de mensagens de *multicast* no fluxo ascendente do porto de um utilizador para outro. As mensagens IGMP do fluxo ascendente do porto de um utilizador particular são, normalmente, mapeados no porto bidireccional do GEM das respectivas CoS (*Class of Service*) atribuídas ao porto do utilizador a partir do qual a mensagem foi originada. Além disso, ainda se aplicam todas as melhorias no plano de controlo estabelecidos no TR-101.

R-5 A rede GPON tem de usar um porto bidireccional GEM para todas as mensagens IGMP do fluxo ascendente, podendo este porto GEM ser partilhado por outras VLANs na mesma interface U que partilham a mesma CoS.

R-6 A rede GPON tem de usar o mesmo porto GEM que transporta os grupos *multicast* para todas as mensagens IGMP do fluxo descendente.

R-7 A rede GPON tem de suportar o transporte de mensagens IGMP sobre o mesmo VLAN *multicast* usado para receber mensagens *multicast* do fluxo ascendente.

R-8 A rede GPON tem de suportar o transporte de mensagens IGMP no fluxo descendente utilizando o mesmo porto *multicast* GEM do fluxo descendente atribuído à VLAN *multicast*.

R-9 A rede GPON tem de suportar o envio de mensagens IGMP no fluxo ascendente usando a mesma porta GEM bidireccional, configurado para outros tráfegos do fluxo ascendente da mesma CoS.

R-10 A ONU e o OLT têm de suportar a identificação e o processamento de mensagens IGMP iniciadas pelo utilizador. Quando esta função está desactivada num porto e / ou VLAN, essas mensagens são transmitidas de forma transparente. Note-se que o encaminhamento transparente de mensagens IGMP de N: 1 VLANs pode resultar na sobrecarga da rede e, portanto, é desencorajado. Sendo assim, esta função não deve ser desactivada.

R-11 A ONU tem de suportar a rejeição de todas as mensagens IGMP recebidas num porto do utilizador e / ou VLAN.

R-12 A ONU tem de suportar grupos de correspondência veiculados por mensagens IGMP para a lista de grupos (R-4) correspondente a uma VLAN *multicast* associada a este porto. Quando não houver nenhuma correspondência, a mensagem IGMP tem de ser enviada como dados de utilizador regular ou perde-se. Este comportamento tem de ser configurável. Quando houver uma correspondência a mensagem IGMP tem de ser enviada dentro de uma VLAN *multicast*.

As mensagens do relatório IGMP V3 podem transportar informações para múltiplos grupos *multicast*. Portanto, uma única mensagem de um relatório IGMP pode transportar informação de associação (*membership*) sobre os grupos que tenham ou não correspondência a uma VLAN *multicast*.

R-13 Após a recepção de um relatório IGMP v3 transportando informação sobre a correspondência e não-correspondência a grupos *multicast* (como descrito acima), a ONU e o OLT terão ser capazes de copiar a trama para a função IGMP *Snooping* (é o processo de escuta do tráfego de rede IGMP, que permite que um switch da Camada 2 "escute" a conversa IGMP entre os hosts e routers através do processamento de pacotes IGMP da Camada 3 enviados numa rede multicast.), bem como encaminhá-lo como sendo dados do utilizador (ou descartá-lo, conforme configurado).

R-14 A ONU tem de suportar mecanismos para impedir que os portos do utilizador injectem tráfego *multicast* nas redes agregadas. Este comportamento tem de ser configurável por porto e / ou VLAN.

R-15 A ONU tem de ser capaz de descartar IGMP *queries* recebidas dos portos do lado dos utilizadores numa VLAN *multicast*.

R-16 A ONU e OLT têm de ser capazes de dizer a quantidade limite de mensagens IGMP recebidas dos portos do lado dos utilizadores numa VLAN *multicast*.

R-17 A ONU e OLT terão de suportar a função *snooping* do IGMP v3 (RFC 3376). Esta característica terá de ser configurada por VLAN.

Nota: V3 inclui o suporte das versões anteriores do IGMP. Especificamente, esta função é responsável por fazer a configuração de filtros de *multicast*, de tal forma que a replicação de pacotes é limitada aos portos dos utilizadores que tenham solicitado a recepção.

R-18 A função *IGMPv3 snooping* do ONU e OLT tem de suportar a capacidade de “bisbilhotar” o endereço IP *multicast* da fonte e endereço IP destino do grupo nos pacotes IGMP e estabelecer os filtros do endereço do grupo MAC correspondente, conforme especificado no R-19.

R-19 A função *IGMPv3 snooping* do ONU e OLT tem de ser capaz de, dinamicamente, criar e apagar entradas do filtro do grupo de nível MAC, permitindo, por sua vez, o encaminhamento de *multicast* selectivo dos VLANs do lado da rede para portos do lado do utilizador.

R-20 A ONU tem de suportar o *leave* IGMP imediato como parte da função *IGMP snooping*.

R-21 Ao detectar mudanças de topologia (por exemplo, alteração da associação VLAN, porto sendo desactivado pelo STP (*Spanning Tree Protocol*) e porto da rede mudando do estado) a OLT tem de ser capaz de emitir uma solicitação de parecer do proxy do IGMP, ou seja, um *IGMP Group Leave* com o endereço de grupo '0.0.0.0'. Isto irá indicar ao BNG (*Broadband Network Gateway*) para, imediatamente, enviar *Group Specific queries*, que irá preencher os filtros *multicast* do L2 no nó de acesso, a fim de acelerar a convergência da rede.

R-22 Para fins de segurança, a ONU tem de descartar qualquer mensagem *IGMP Leave* para o grupo '0.0.0.0', iniciada pelo utilizador.

R-23 A ONU tem de suportar *marking*, no fluxo ascendente, tráfego IGMP iniciado pelo utilizador com bits de prioridade Ethernet.

R-24 A ONU tem de suportar mensagens de encaminhamento IGMP iniciadas pelo utilizador para uma determinada VLAN *multicast* ao qual o utilizador está ligado.

R-25 A OLT deve fornecer as seguintes estatísticas.

- Por VLAN, por contadores de grupos *multicast*
 1. Número total de *hosts* activos no momento

- Por porta DSL, por contadores de VLAN *multicast*:
 1. Número total de ligações ao grupo bem sucedida
 2. Número total de ligações ao grupo mal sucedidas
 3. Número total de mensagens *Leave*
 4. Número total de *Queries* gerais enviados aos utilizadores
 5. Número total de *Queries* específicos enviados aos utilizadores
 6. Número total de mensagens IGMP inválidas recebidas

- Por contadores VLAN *multicast*:
 1. Número de grupos activos no momento
 2. Número total de ligações ao grupo enviadas
 3. Número total de ligações ao grupo recebidos dos utilizadores
 4. Número total de ligações ao grupo bem sucedida dos utilizadores
 5. Número total de ligações ao grupo mal sucedida dos utilizadores
 6. Número total de mensagens *Leave*
 7. Número total de mensagens *Leave* recebidas dos utilizadores
 8. Número total de *Queries* gerais enviados
 9. Número total de *Queries* gerais recebidas da rede
 10. Número total de *Queries* específicos enviados aos utilizadores
 11. Número total de *Queries* específicos recebidos da rede
 12. Número total de mensagens IGMP inválidas recebidas

R-26 A ONU tem de suportar a configuração de que portos do utilizador são membros de uma VLAN *multicast*

R-27 A ONU e OLT têm de ser capazes de configurar o número máximo de grupos *multicast*, simultaneamente, permitidos por interface U.

Nota: Isto permite ao nó de acesso proteger contra ataques de negação de serviço.

R-28 A ONU e OLT têm de permitir *IGMP snooping* por cada VLAN.

R-29 A ONU tem de descartar mensagens IGMP v1.

R-30 A ONU tem de suportar a função *IGMP/PPPoE* (Point-to-Point Protocol over *Ethernet*) *snooping* transparente. Essa capacidade vai utilizar os métodos

descritos para a classificação e criação de filtros de endereço do grupo, baseando-se nos requisitos básicos

R-31 Para os pacotes IGMP observados no cenário PPPoE, a ONU tem de ser capaz de desencadear uma função local *IGMP Host* (também conhecido como "eco client"), quando um grupo se liga ou sai por um porto do lado do utilizador. A função local *IGMP Host* deve então gerar, localmente, mensagens IGMP / IPoE (*Internet Protocol over Ethernet*) - *membership report/leave* - e localmente responde ao *IGMP Membership queries* para mostrar os grupos cuja entrega à ONU é necessária. A função *IGMP Host* tem de ser desencadeada no contexto da *VLAN multicast*.

R-32 O *triggering* do *IGMP Host* local na ONU tem de ser configurável por cada *VLAN multicast* e porto do utilizador.

R-33 O OLT tem de suportar *IGMPv3 Snooping* com relatórios do *proxy*. Essa característica tem de ser configurável por cada VLAN.

R34 O OLT tem de permitir a selecção entre o *snooping* transparente e o *snooping* com *proxy reporting*, por cada-VLAN

R35 O IGMP com a função *proxy reporting* tem de suportar funções de *IGMP proxy query*.

R36 A função *proxy-reporting* do OLT tem de suportar o *marking* do tráfego IGMP que inicia com os bits de prioridade Ethernet (VLAN).

R37 O OLT tem de ser configurável para cada porto do utilizador com uma "lista branca" de grupos *multicast* permitidos para esse porto do utilizador.

R38 O OLT e a ONU têm de descartar qualquer relatório IGMP recebidos de um porto do utilizador e que não coincida com a "lista branca" associada a esse porto d utilizador

R39 A ONU não deve esperar que a sua lista branca seja actualizado pela OLT após a recepção de um relatório IGMP.

R40 O OLT tem de ser configurado com uma lista de VLANs e grupos *multicast* que têm de ser encaminhados no fluxo descendente usando os portos GEM bidireccionais, ou seja, VLANs e grupos que não serão *multicast* para todos os ONUs usando um porto GEM *multicast*.

R41 A OLT não deve encaminhar nenhum tráfego *multicast* configurado para usar um porto bidireccional GEM para portos GEM dos ONUs que não

estejam associados com a VLAN *multicast* e grupo ou que não juntaram-se ao grupo.

R42 Após a recepção de um relatório IGMP para juntar-se a um grupo *multicast* configurado para ser entregue usando portos bidireccionais GEM, o OLT tem de encaminhar o tráfego *multicast* associado ao porto (s) GEM unicast através do qual tenha recebido o referido relatório IGMP.

No GPON temos as seguintes camadas protocolares, respeitando a norma G.984.3:

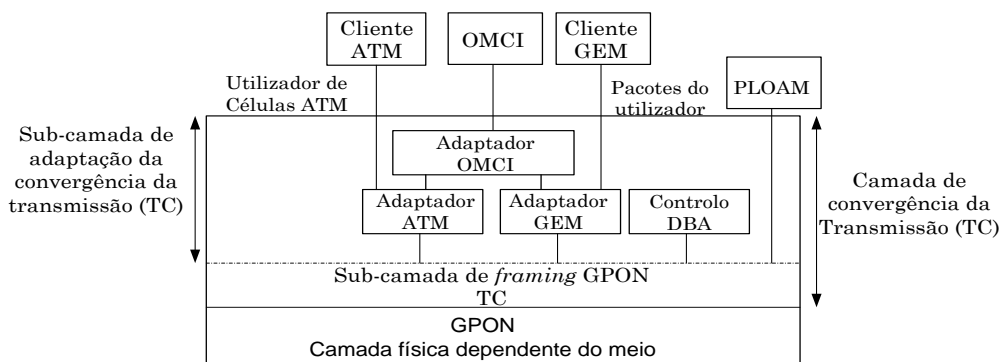


Figura 40 - Pilha protocolar dum nó GPON, com todas as camadas.

Na Figura 41 tem-se uma visualização mais detalhada, das sub-camadas de adaptação e de *framing*/trama:

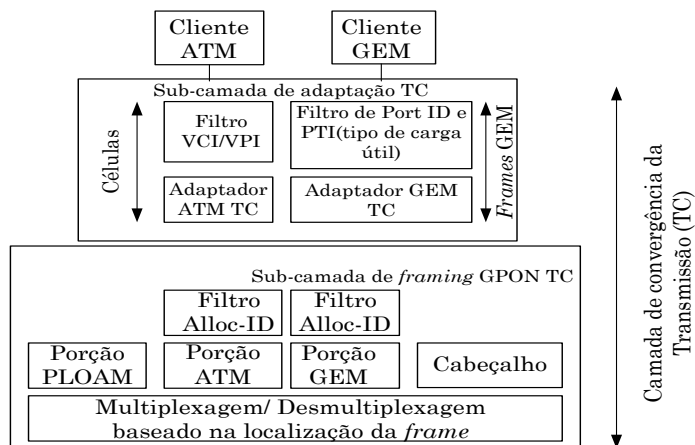


Figura 41 - Vista das sub-camadas de adaptação e de *framing*.

O fluxo GEM consiste num quadro com um período de 125µs do GPON, cujo comprimento poderá ou não coincidir com o do cliente. Caso não coincida, torna-se necessário o encapsulamento, que neste caso refere-se ao processo de colocação de um pacote de cliente que pode ser mais curto do que o quadro GPON, ou se o quadro do

cliente for maior que a do GPON, dividindo em fragmentos que são transmitidos, fragmento por fragmento em sucessivas tramas GPON.

Na direcção de saída em um nó, os quadros são colocadas juntos na partição do GEM da Figura 41. Um cabeçalho é elaborado e anexado, incorporando a OAM, que são as funções de controlo que vão em todos os pacotes. Estes incluem nomeadamente a atribuição de largura de banda dinâmica (DBA), o pedido e a concessão de largura de banda dinamicamente.

No sentido ascendente, o tráfego é realizado em T-Conts (contentores de transporte). Qualquer T-Cont pode transportar apenas o tráfego ATM ou apenas o tráfego com quadros GEM ou uma mistura de ambos, obtendo-se alguns T-Conts ATM e outros T-Conts da *frame* GEM. No caso em que ambos os tipos de tráfego são transportados num quadro de 125 μ s é referida como modo de utilização dual. Tanto o fluxo ATM como o fluxo do quadro GEM podem ser multiplexados dentro dum T-Cont.

O fluxo de tramas/pacotes GEM pode consistir na utilização de vários portos, cada um interligando um determinado par de entidades de software ou hardware, uma no lado do OLT e outra no lado do ONU. Para as tramas de entrada GEM a filtragem feita pelo adaptador TC do GEM considera o que o bloco de alocação de Alloc-ID tiver, relativamente ao ID do seu porto de 12-bits e após à filtragem do circuito virtual (VCI) envia-os para uma outra filtragem de acordo com os IDs do porto e indicador do tipo do porto (PTI) e depois para o cliente do quadro GEM. Na direcção de saída do nó, o processo é inverso.

Conforme se pôde ver na Figura 41, a sub-camada de convergência de transmissão GPON (*GPON Transmission Convergence layer*) também permite fazer operações, gerir e fazer a manutenção de informações da camada física (PLOAM) utilizado, uma vez que a função principal do GTC é proporcionar a multiplexagem do transporte entre a OLT e ONUs.

O quadro de dados do canal de distribuição, para o fluxo descendente é o seguinte:

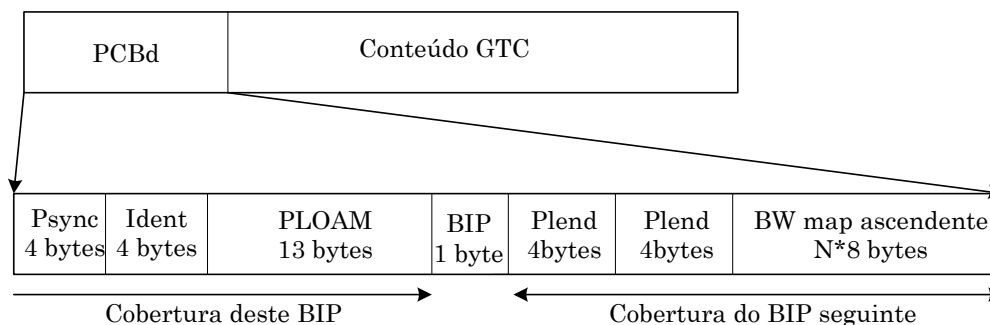


Figura 42 – Quadro GPON, fluxo descendente - campo PCBd

O bloco de controlo físico PCBd (*Physical Control Block - downstream*) para um canal de distribuição contém vários campos e é transmitido para todas as ONU na GPON, em forma de *broadcast*. Deste modo, cada ONU recebe o PCBd e opera segundo a informação contida no campo. O campo PCBd está formatado da seguinte forma (ver Figura 42).

- Sincronização física, ***Psync***: comprimento de 32 bits;
- Campo de identificação, ***Ident***: comprimento de 32 bits.
- Campo de operação, administração e gestão da camada física na direcção descendente, ***PLOAMd***.
- Contém uma mensagem ***PLOAM***: comprimento 13 bytes.
- Campo do código de paridade **BIP** (*Bit Inter-leaved Parity*): comprimento 8 bits.
- Campo ***Plend*** (*Payload Length Indicator*): comprimento do conteúdo(payload) 32 bits.
- Campo do mapa de largura de banda, **BW map**, que contém um arranjo de estruturas de 8 bytes, representando a simples alocação de largura de banda para uma ONU em particular na GPON.

O campo da carga útil (*payload*) vem conforme a Figura 43:

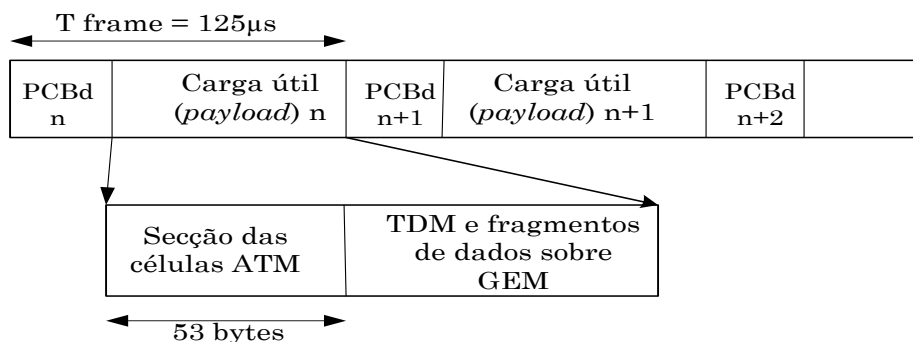


Figura 43 – Quadro com os campos do conteúdo (payload)

O trama de dados no canal de retorno, isto é no fluxo ascendente é o seguinte:

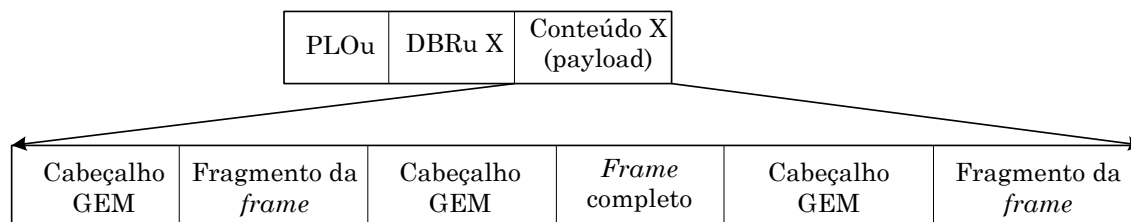


Figura 44 – Campo Payload GPON, fluxo ascendente - GEM

Na direcção ascendente uma trama tem uma duração constante de $125\mu\text{s}$ para os sistemas de 1.244Gbps e 2.488Gbps, além disso, tem um comprimento de 19.44 bytes e 38,88 bytes, respectivamente. As transmissões no canal de retorno consistem numa série de quadros individuais originadas pelas ONU na GPON. Cada rajada contém o cabeçalho da camada física PLOu (*Physical Layer Overhead - upstream*), e uma carga útil (payload) adicional do cliente, contém um campo opcional de PLOAMu (*PLOAM upstream*), e um campo dinâmico para reportar a largura de banda (DBRu).

A trama do fluxo ascendente tem uma duração de $125\mu\text{s}$ igualando a duração da trama de *download*. Cada trama contém um número arbitrário de transmissões de uma ou mais ONU, sendo as mesmas organizadas da forma definida pelo campo BWmap e durante cada período de alocação de transmissão a ONU pode transmitir um quadro de dados do utilizador ou enviar os campos de controlo já mencionados.

Os campos são:

- **PLOu**: campo de comprimento variável, dependendo da locação da ONU.
- **PLOAMu**: campo de 13 bytes de comprimento.

- **DBRu**: campo de comprimento variável, dependendo da alocação dinâmica de largura de banda de GPON (DBA) e do número de contentores TCON (*T-Containers*) de transferência por cada ONU.

O OLT indica através do campo BWmap se os campos opcionais PLOAMu, PLSu ou DBRu deveriam ser enviados e com que alocação da banda. A planificação do OLT precisa ter em conta a grande procura de largura de banda e o atraso desses campos auxiliares no momento de estabelecer a frequência das suas transmissões.

O quadro GEM, é dado pela Figura 45:

PLI 12 bits	Port-ID 12 bits	PTI 3 bits	HEC 13 bits	Fragmentos do conteúdo (payload)
----------------	--------------------	---------------	----------------	--

Figura 45 – Estrutura do quadro GEM.

O modo de encapsulamento GPON GEM (*GPON Encapsulation Mode*) permite uma maior flexibilidade de encapsulamento e transmissão de pacotes IP de tamanho variável ao longo dos *loops* TDM.

No entanto, os quadros Ethernet são transportados directamente no campo conteúdo (*payload*) do quadro GEM.

O cabeçalho do padrão GEM (ver Figura 45) contém os seguintes campos:

- Campo **PLI**, indicador do comprimento do conteúdo (*Payload Length Indicator*): comprimento de 12 bits e contém a extensão do conteúdo após o cabeçalho.
- Campo **PORT ID** (Identificação da Porta), usa-se para fornecer os 4096 indicadores únicos de tráfego, permitindo eficiência na multiplexagem do tráfego.
- Campo **PTI** (tipo de conteúdo), indica que tipos de dados são transmitidos no quadro GEM, definindo seu tratamento: tem 3 bits de comprimento.
- Campo **HEC** (codificação/descodificação da mensagem): comprimento de 13 bits e é uma combinação do código BCH (39,12,2) e um simples bit de paridade.

❖ Antes da transmissão faz-se o XOR do cabeçalho GEM com “B6AB31E055”.
[20]

No sentido descendente faz-se a transmissão do quadro do OLT para o ONU usando-se o campo do conteúdo (*payload*) do quadro GTC, podendo o OLT alocar até todo o quadro descendente. A sub-camada *framing* do ONU filtra os quadros que vão chegando baseando-se no Port-ID e entrega os mesmos aos clientes ONU GEM correspondentes.

No sentido ascendente a transmissão do quadro do ONU para o OLT usa o tempo de alocação configurado (125µs) no GEM. O ONU armazena os quadros GEM à medida que vão chegando, e depois, envia-os em rajadas, isso quando tiver a alocação de tempo, dado pelo OLT, para o fazer. O OLT recebe os quadros e os multiplexa com rajadas de outros ONUs, passando-os todos para o cliente OLT GEM.

Veja-se de seguida o diagrama de blocos do sistema GPON.

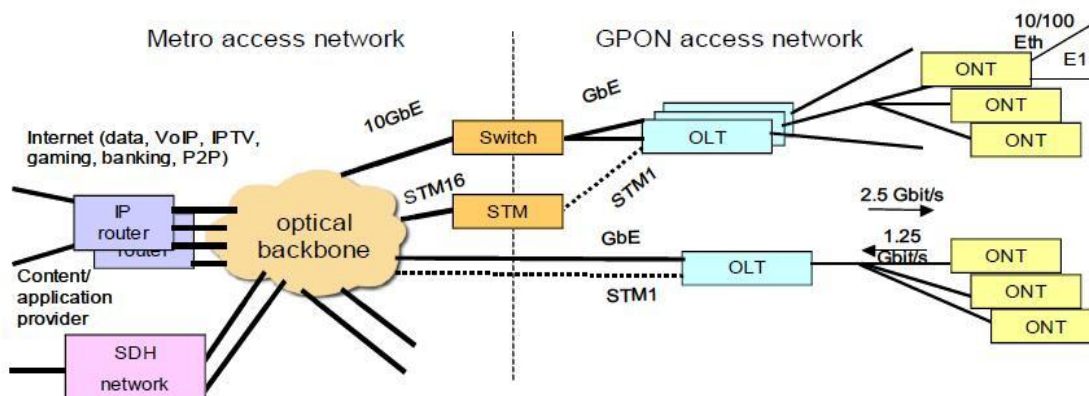


Figura 46 – Diagrama de blocos do sistema GPON. [21].

No entanto, neste trabalho debruçamo-nos sobre a implementação do cenário *Multicast* apenas no bloco OLT, cujo diagrama de blocos é:

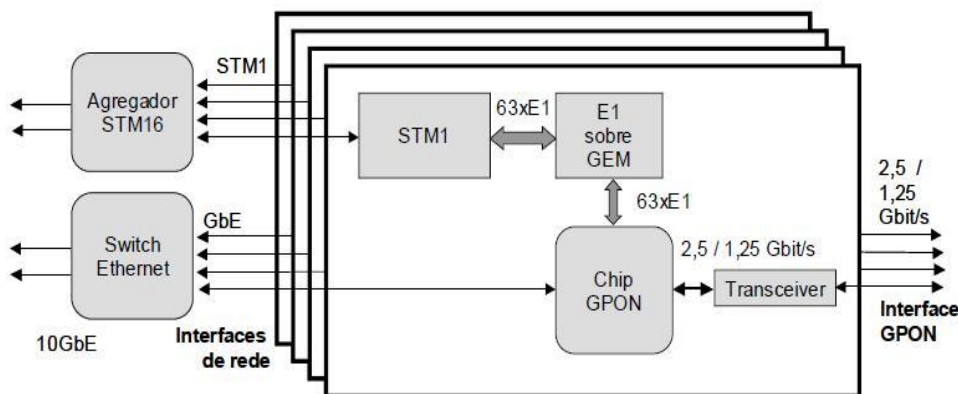


Figura 47 - Diagrama de blocos do OLT - GEM. [21].

O diagrama do OLT integra-se no sistema em estudo da seguinte forma:

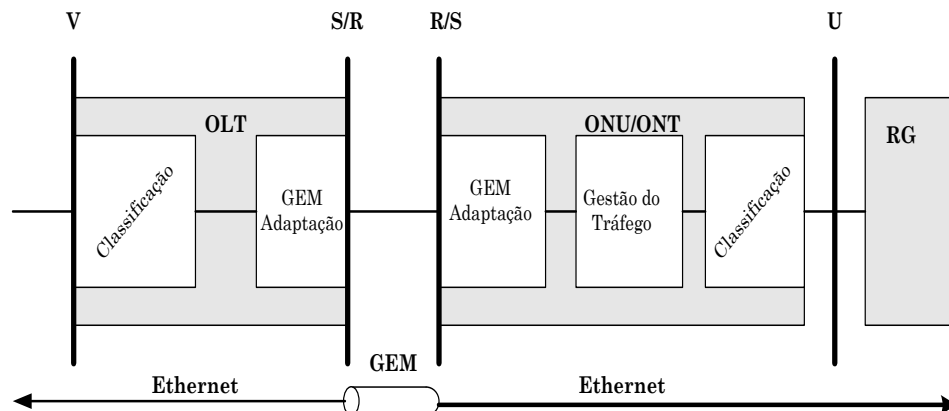


Figura 48 - Adaptação Ethernet do GPON GEM.

A transmissão e a recepção de informação, fazem-se segundo as Figura 49 e Figura 50, onde estão representados o processo a que as mesmas estão sujeitas.

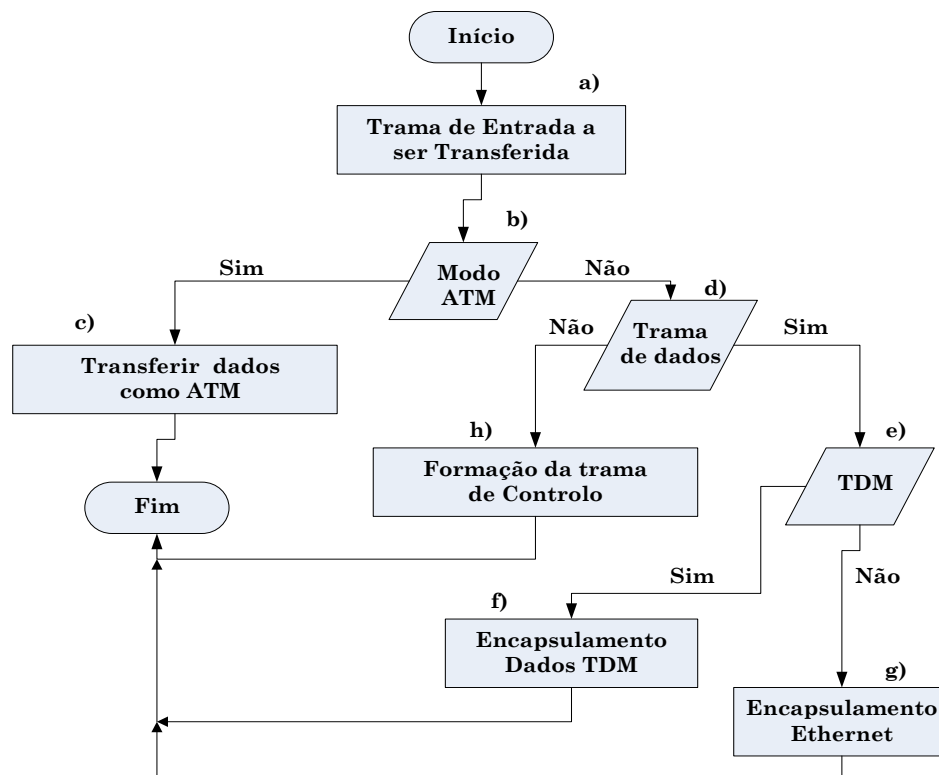


Figura 49 - Fluxograma mostrando os passos da transmissão de dados, usando quadros GEM.

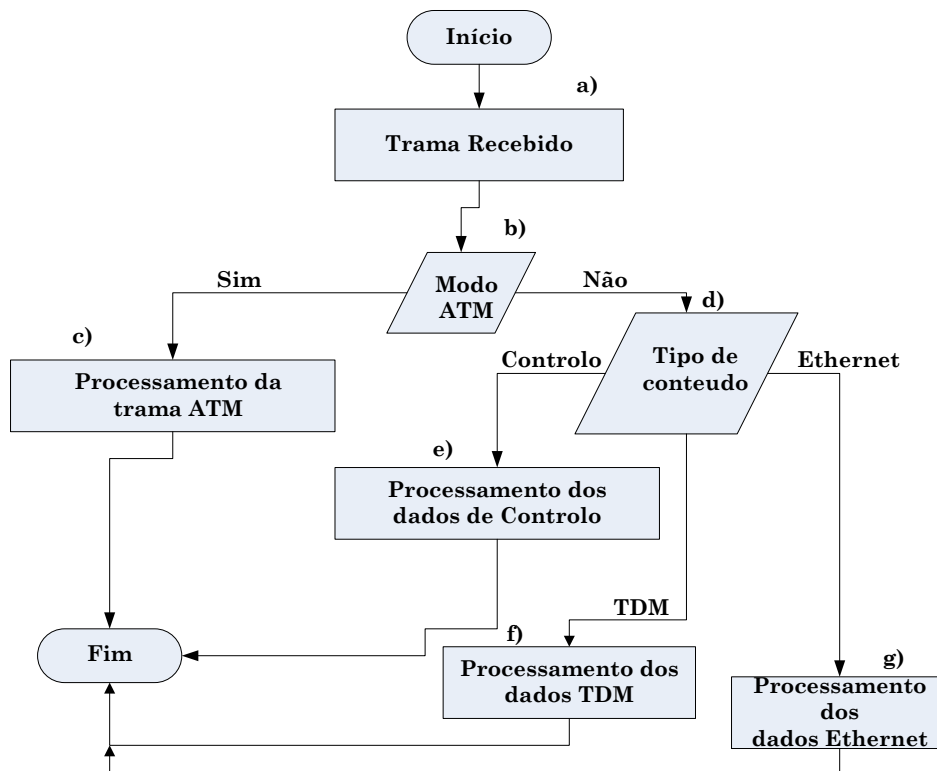


Figura 50 - Fluxograma mostrando os passos da recepção de dados, usando tramas GEM.

Na Figura 49 temos um fluxograma representando os passos para a transmissão de dados numa rede GPON, através do método de processamento de dados que usa a trama GEM. Primeiro, se uma trama a ser transmitida chegar (a)), verifica-se o tipo do quadro a ser transferido, se é ou não ATM (b)) e caso o seja, é transmitida como tal (c)), caso contrário considera-se que é um quadro GEM, procedendo-se à verificação se o mesmo é de controlo ou de dados (d)). Se o quadro for de dados (e)), faz-se a verificação para saber-se qual o método de transmissão a ser usado, se TDM ou Ethernet, e conforme forem será processado usando-se o encapsulamento de dados TDM (f)) e encapsulamento de dados Ethernet (g)), respectivamente. Se o quadro não for de dados cria-se o quadro de controlo (h)), sendo depois transferido.

Na Figura 50 apresentamos o fluxograma que representa os passos a serem executados na recepção de dados, usando a trama GEM. Primeiro, se a ONU receber um pacote de dados (a)), verifica-se se a trama a ser transferida é ou não ATM (b)) e caso o seja, o quadro será processado como tal (c)), caso contrário verifica-se qual é o tipo do conteúdo (*payload*) chegado (d)). Faz-se a verificação se o conteúdo é de controlo ou de dados (d)). Se o conteúdo não for de dados, o mesmo será processado

como sendo de controlo (e)), senão faz-se a verificação para se saber se é TDM ou Ethernet, e conforme for será processado como TDM (f)) e como Ethernet (g)), respectivamente.

4.3 FPGA

Muitas aplicações emergentes em comunicação, computação e electrónica necessitam que as suas funcionalidades permaneçam flexíveis, mesmo depois de o sistema já ter sido fabricado.

Essa flexibilidade é fundamental uma vez que os requisitos dos clientes, as características dos sistemas, as normas e protocolos podem mudar durante a vida do produto. Podendo também permitir novas abordagens de implementação direccionadas para a melhoria do desempenho, redução dos custos do sistema ou redução do consumo de energia. A flexibilidade operacional pode ser conseguida através de actualizações de software, mas desta forma as alterações serão limitadas à parte programável dos sistemas.

Com os desenvolvimentos da tecnologia de FPGAs, dá-se o suporte para alterações rápidas em tempo real de execuções do hardware do sistema, sendo as mesmas referentes a mudanças em circuitos digitais através da reconfiguração sem ter de interromper a operação. Graças a essas tecnologias a implementação de sistemas que requerem flexibilidade, alto desempenho, elevada taxa de transferência de dados e eficiência no consumo de energia tornaram-se possível, incluindo aplicações de comunicações sem fio reconfiguráveis, sinais digitais adaptáveis e processamento de imagens em tempo real, sistemas de computação de alto desempenho, televisão digital, produtos para consumo que podem ser actualizados remotamente.

Os FPGAs podem ser usados para implementar as seguintes funcionalidades:

- Codificação/Decodificação;
- Processamento de sinal;
- Manipulação áudio, vídeo, imagem;
- Encriptação;
- Correção de erros;
- Geração de números aleatórios;
- Processamento de pacotes.

E as seguintes aplicações, em tempo real:

- Óptica adaptativa;
- Criptografia;
- Televisão com alta definição (HDTV);
- Rádio móvel;
- Reconhecimento de imagem e discurso;
- Segurança;
- Tradução do formato vídeo.

4.3.1 OLT PON num chip FPGA

A disponibilização de serviços “*Quadruple Play*” (voz, dados, vídeo e serviços sem fio) com acesso IP de alta velocidade a instalações residenciais ou empresariais está perdendo terreno, comparativamente, às tecnologias e soluções GPON/EPON que a pouco e pouco se vêm tornando dominantes. Esses serviços podem, para que possam atingir taxas mais elevadas utilizando menos energia, ser implementadas em FPGAs integrando mais funções num *chip*.

Com os requisitos do TR-101 e a ligação ao transporte Ethernet de sinal, em redes *metro*, a solução em *chips* do PON OLT deverá integrar processamento de rede, funções de gestão de tráfego, etc. As soluções PON OLT são construídas de forma dispendiosa, podendo incluir gestor de tráfego, processador de rede, blocos para os serviços *Quadruple Play*, conjuntamente com uma placa SERDES também dispendiosa, pelo que tem de saber-se se as mesmas foram projectadas para a adopção em massa de serviços FTTH. [22]

Veja-se de seguida algumas das funcionalidades que se poderão incluir nos *chips* PON OLT.

Funções de rede:

- VLAN (redes locais virtuais);
- Filtragem das camadas (L2 a L5) e Listas de Acesso;
- TR-101/ WT-156;
- DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*);
- MAC;
- Encaminhamento *Multicast*;
- *IGMP Snooping*.

Funções de gestão de tráfego de rede:

- Filtragem, Medição e Coloração da QoS;
- Policiamento e Modelação por fluxo;
- QoS hierárquico.

Funções de “PON framer”:

- Reagrupamento dos pacotes de entrada;
- Camada de adaptação do GEM Ethernet;
- DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*);
- Encriptação.

Descrever-se-á agora, de forma sucinta a arquitectura do FPGA - VIRTEX, salientando-se as características que são importantes para este trabalho.

4.3.2 Arquitectura Virtex

Os FPGAs da família Virtex contém blocos lógicos configuráveis CLB (*Configurable Logic Blocks*), blocos de entrada/saída IOBs (*Input/Output Blocks*), blocos de memória RAM, recursos de relógio, configuração do circuito eléctrico e encaminhamento programável. Cada CLB possui recursos para o encaminhamento local e ligação com a matriz de encaminhamento geral, GRM (*General Routing Matrix*). Esta arquitectura apresenta blocos de memória RAM dedicados (BRAMs) de 4096 bits cada um, e conta com 4 a 8 blocos dedicados, que implementam as funções de DLLs (*digital Delay-Locked Loop*) para o controle, distribuição e compensação de atrasos do relógio. A funcionalidade deste dispositivo é determinada através do arquivo de configuração, denominado *bitstream*. Os arquivos de configuração contém um conjunto de comandos e dados, que podem ser lidos e escritos através de uma das interfaces de configuração da Virtex.

Os dispositivos VIRTEX têm a arquitectura interna organizada em colunas, podendo as mesmas serem lidas ou escritas individualmente. Logo, é possível reconfigurar, parcialmente, esses dispositivos através da modificação destas colunas no arquivo de configuração.

4.3.2.1 Família Virtex-5

Todos os dispositivos Virtex-5 são baseados na arquitectura ASMBL (*Advanced Silicon Modular Block*), da Xilinx. A Xilinx projectou um conjunto de colunas, incluindo uma coluna lógica, uma coluna de memória, uma coluna de processamento digital de sinal DSP, e assim por diante. Para cada domínio de aplicação - como o processamento digital de sinal, DSP – a Xilinx determina a proporção ideal de lógica, memória, porção de DSP, e assim por diante. Em seguida, a Xilinx cria um conjunto de componentes, todos baseados na mesma combinação, mas com uma gama de capacidades. Este conjunto é geralmente designado de plataforma.

A família Virtex 5 oferece a mais alta performance, permite ligações com maior flexibilidade, tem energia optimizada, custos de sistema mais baixo e a máxima produtividade.

Baseado nisso, a Xilinx tem quatro tipos de plataformas optimizadas, tais como:

- **Virtex-5 LX** – Plataforma para a lógica de alto desempenho.
- **Virtex-5 LXT** - Plataforma para a lógica de alto desempenho com conectividade em série.
- **Virtex-5 SXT** - Plataforma de alto desempenho com processamento digital de sinal – DSP, com conectividade em série.
- **Virtex-5 FXT** - Plataforma com processadores embebidos com elevado desempenho e com conectividade em série.

Pelos motivos expostos anteriormente, e como para o sistema que queremos implementar quer-se um FPGA que tenha SERDES (Serializer/Deserializer) e processadores internos optámos pelo VIRTEX 5 –FXT:

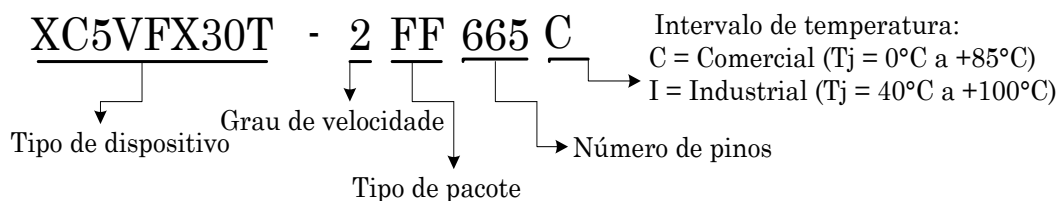


Figura 51 - Família VIRTEX 5 usada.

Esse dispositivo foi desenhado para as especificações IEEE 802.3, e possui as seguintes características [23]:

- Máximo número de utilizadores I/ O: 360;
- Os transceptores podem ser usados como PHY;
- Operações I/ O: 1.2V a 3.3V, com a tensão no núcleo (*core*) de 1.0V;
- Circuito de correcção de erros integrado (opcional);
- Cada VIRTEX 5 contém: 6 input-LUTs, e 4-Flip flops;
- Frequência de relógio 550 MHz, ficheiros de gestão (2 DCM + 1 PLL): 2 a 6;
- Bloco RAM de 550 MHz: 2.448 – 16.416;
- “Fatias” (*slices*) 550 MHz DSP48E: 64 – 320;
- Blocos de processador PowerPC 440: 1 – 2;
- Controladores de Acesso ao meio Ethernet: 4 a 8;
- Blocos PCI Express nos extremos: 1 a 4;
- Transceptores RocketIO GTX: 8 a 24;
- Bloco SERDES (*Serializer/Deserializer*), converte os dados (até 10Gbps) em série para paralelo (Transmissor), e vice-versa (Receptor).
- Tecnologia 1.25 Gbps SelectIO™, para conectividade paralela.

4.3.3 Implementação IGMP Controlled Multicast no OLT PON no VIRTEX 5

Veja-se na Tabela 11 as aplicações e respectivas soluções da tecnologia GPON em que a transmissão ascendente é feita usando-se os IDs dos portos GEM e a transmissão descendente é feita usando-se o MAC da fonte e/ou os IDs das VLANs (*Virtual Local Area Networks*).

VLANs pois através deste conceito de redes locais virtuais torna-se possível a criação de várias redes locais (virtuais) dentro da mesma rede física, existindo várias formas de o fazer:

- VLANs baseadas em MAC, em que o *switch* pode fazer a divisão das redes baseando-se nos próprios endereços máquina das estações;
- VLANs baseadas em protocolos de rede, em que se leva em consideração o tipo de protocolo de rede contido no pacote Ethernet (IPv4, ARP, IPx);
- VLANs baseadas em portos, sendo as mesmas criadas com o agrupamento das portas do *switch*, em que os clientes ligados a um ou mais portos do *switch*

fazem parte da mesma VLAN. Desta forma concentram-se vários clientes num único *uplink*, uma vez que por razões de segurança e de privacidade os clientes são impedidos de trocar informação entre si.

Tabela 11 - GPON: Aplicações e soluções.

<i>Aplicações da tecnologia GPON</i>	<i>Soluções Virtex 5</i>
PON MAC	GPON MAC
Ethernet MAC	10/100/1000 MAC, e 10Gbit MAC, Suporta multicast
Encriptação	Núcleos AES
FEC	Códigos <i>Reed-Solomon</i> FEC
Gestão de Tráfego da rede	Tráfego de referência de gestão de projectos escalável, e núcleos IP Controladores dos pacotes de memória de alta velocidade Programadores multi- nível Gestores de filas
Processamento de pacotes	Módulos de processamento de pacotes Processador de pacotes

O GPON permite ao OLT, através do OMCI, determinar a direcção da transmissão (ascendente ou descendente) para cada canal GEM dentro do processo de configuração.

De seguida apresentam-se as especificações dos OLT e ONU/ONT, da rede GPON:

- OLT:

- FEC;
- AES;
- Até 128 ONUs/ ONTs por PON;
- Gestão remota da transmissão sobre o canal OMCI [24];
- Tensão de 36V a 72V;
- 512 Portos T-CONT, por PON;
- 4096 IDs dos portos GEM, por PON;
- Alcance lógico de 60km;
- Máxima distância diferencial de 20km;
- Elevado desempenho, com ligações de velocidade máxima;
- Potências (valores médios):
 - Tx (descendente 1490nm) - $+5dBm < P_{out} < +6dBm$
 - Rx (ascendente 1310nm) - $-31dBm < P_{out} < -10dBm$

- ONU/ONT:
 - FEC (descendente e ascendente);
 - AES;
 - Gestão da transmissão sobre o canal OMCI PLOAM e canal OAM [24];
 - 8 portos T-CONT, por PON;
 - 32 IDs dos portos GEM, por PON;
 - Potências (valores médios):
 - Tx (ascendente 1310nm) - $+1dBm < P_{out} < +6dBm$
 - Rx (descendente 1490nm) - $-27dBm < P_{out} < -8dBm$

A transmissão *multicast* inclui os passos seguintes:

1. Estabelecer uma ligação *multicast*, em que:
 - a. ONTs pré-determinados estão registados num determinado grupo *multicast*, através dos quadros IGMP;
 - b. Por sua vez, o OLT atribui um porto ID *multicast* a uma mensagem transmitida do router para o grupo *multicast*, e depois transmite a mensagem;
2. Para a transmissão das mensagens *multicast* no modo GEM:
 - c. O OLT atribui um porto ID *multicast* a uma mensagem transmitida do router para o grupo *multicast*, e depois transmite a mensagem;
 - d. O ONT pertencente ao OLT, filtra a mensagem ao ID do porto *multicast* que lhe está atribuído.

Os endereços *multicast* possíveis (forçosamente, da classe D com 2^{28} grupos *multicast*) são:

- Endereços globais (normalmente, usado na Internet): 224.0.1.0 a 238.255.255.255;
- Endereços locais: 239.0.0.0 a 239.255.255.255;
- Endereço IGMP (TCP): 224.0.0.22;
- Simples: 224.0.1.115;

- Bloco Fonte específico: 232.0.0.0 a 232.255.255.255 (endereços IP *Multicast Source Specific*), usado no IGMPv3, com os quais, os receptores poderão escolher, especificamente, a fonte de onde querem receber pacotes, ou aquela da qual não querem receber nada.

Os endereços IP *Multicast Source Specific* são **232.0.0.0 - 232.255.255.255**, que permitem ao cliente escolher, especificamente, a fonte de onde quer receber pacotes, ou aquela da qual não quer receber pacotes. Como os endereços *multicast* Ethernet são necessários para entregar pacotes *multicast* em redes Ethernet foi usada a gama de endereços *multicast* Ethernet, respeitando o IGMP versão 3:

➤ **224.0.1.0 - 224.0.1.255 (256 conteúdos/serviços).**

Na Figura 52 temos a abordagem feita ao sistema, com a implementação da funcionalidade Multicast no OLT para o Virtex 5, usando o código VHDL.

Fazemos a comparação, do lado do OLT (“concentrador” da rede), entre a gama de endereços *multicast*, correspondentes aos grupos *multicast*, disponibilizados pelo OLT e os endereços das várias ONUs, e caso o endereço do ONU esteja dentro dessa gama (pertence a um determinado grupo *multicast*) terá acesso á informação enviada pelo OLT.

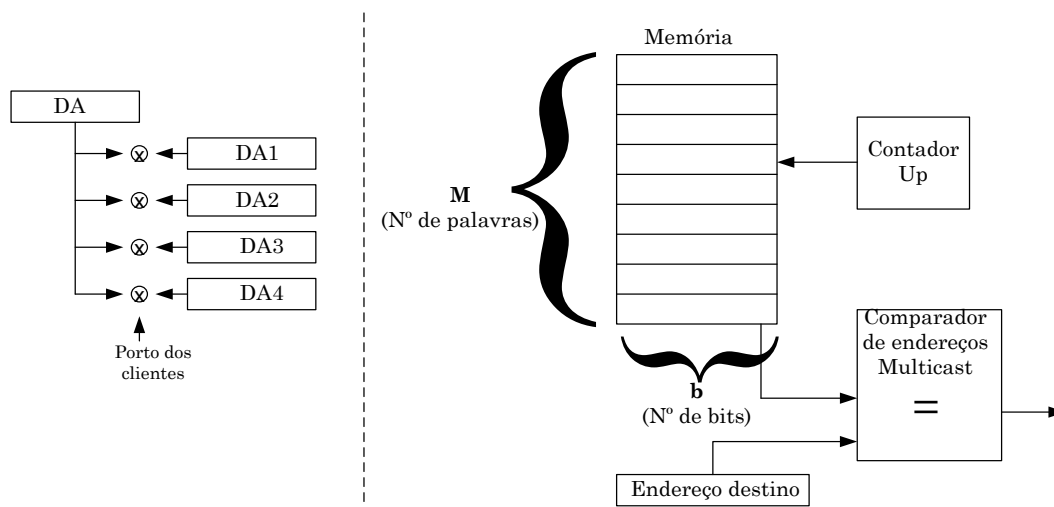


Figura 52 – Implementação da funcionalidade *Multicast* feita no OLT para o Virtex 5, usando o ISE 10.1.

Na Figura 53 temos as propriedades usadas na configuração do Virtex 5 usando o ISE 11.1, e parte do código VHDL usado para a implementação do sistema referido:

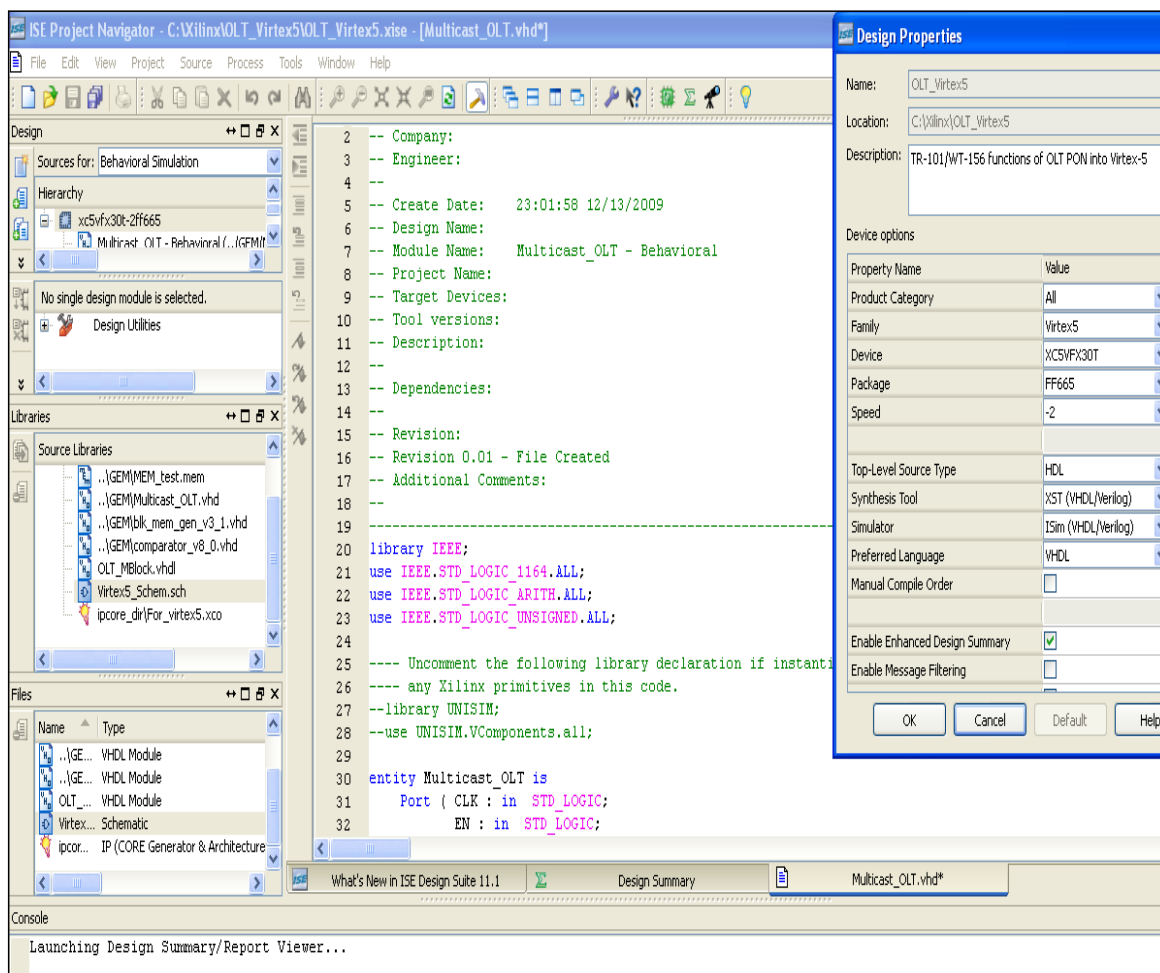


Figura 53 – Propriedades do projecto.

Na implementação da proposta feita deparámo-nos com algumas dificuldades, sendo a mais relevante os erros de código que até à data da entrega desta dissertação não foram ultrapassados, impedindo-nos de fazer a balanço final do sistema em termos da quantidade de memória, LUT e slices utilizados.

Capítulo 5 - Conclusões Finais

Esta tese apresenta um estudo das técnicas de implementação de mecanismos de encaminhamento *Multicast*. Devidos a vários factores deparámo-nos com algumas dificuldades na implementação do sistema proposto, e por isso optámos por uma abordagem mais simplista, ver Figura 52 e Figura 53, e sem levar em conta o desempenho, verificámos que a implementação de funções de tráfego *multicast* nos dispositivos de lógica programáveis, FPGA, é viável.

Fizemos uma breve descrição das características das redes de acesso passivas com capacidade de Gbp, sendo actualmente, a maior tendência do mercado português e não só, para atendimento às necessidades de acesso a elevadas velocidades de transmissões de dados.

São esperados aperfeiçoamentos e adequações das soluções para o fornecimento de banda larga, tendo este mercado enorme potencial de crescimento, embora ainda não esteja, totalmente, definido qual o melhor modelo de negócio a ser proposto para preencher toda essa demanda.

Verificamos que, com a chegada das tecnologias e redes da próxima geração (NGN), existe a necessidade de melhorar ou substituir completamente o actual modelo de negócio assente nas redes de cobre.

Os serviços que actualmente, são transportados em tecnologia IP são os serviços “*quadruple-play*” - voz, dados, vídeo e *wireless*, onde a televisão de alta definição (HDTV) e jogos online já são uma realidade e esse crescimento torna a gestão de tráfego necessária em todos os níveis da rede.

A tecnologia já existe (GPON), a procura também e, nomeadamente, as soluções em FTTx onde a arquitectura em fibra óptica a ser escolhida, trará largura de banda ilimitada e QoS (*Quality of Service*).

A Ethernet é amplamente a tecnologia de ligação mais usada estando anteriormente limitada a LAN e WAN e agora está a ser usada nos mercados de vídeo industrial, medicina e defesa. A mesma pode ser utilizada não só para o percurso de dados mas também no controlo de aplicações, tais como: sistema de gestão, monitorização remota e *debug*.

Uma razão para a utilização de Ethernet em *chips* é a sua interoperabilidade, isto porque, normalmente, um sistema usa dois ou até três dispositivos de diferentes fornecedores e uma interface que não possa garantir a interoperabilidade entre

dispositivos de diferentes fornecedores deixa de se tornar prático, limitando assim a maioria dos engenheiros.

Para que tudo isto seja, economicamente, viável a Ethernet muda de aplicações tradicionais de rede para aplicações embebidas, tornando-se num padrão essencial de conectividade para os FPGAs, que são os *chips* mais usados para construir lógica personalizada para sistemas embebidos. Por isso os FPGAs oferecem uma solução ideal para a implantação (nos blocos OLT e ONUs/ONTs) das redes NGN, usando a tecnologia FTTH/GPON, isto devido ao seu alto desempenho, flexibilidade, escalabilidade, baixo custo de desenvolvimento e sem risco de se tornar obsoleto. [25]

Tem-se criado regulamentação com regras claras para o jogo da concorrência para que todos consigam, realmente, implementar as referidas NGN.

Pelos resultados obtidos recentemente, pelo consultor de Telecomunicações BMP-TC, sabe-se que o número de lares ligados a FTTH duplicou de 5.7 para 11.7 milhões, existindo neste momento, 185 projectos de maior referência em mais de 30 países de Europa, o que demonstra a real dinâmica deste mercado. Os municípios e as empresas de serviços públicos têm mostrado taxas de crescimento de 230% nos projectos de fibra, em que muitos deles têm os seus modelos de acesso aberto. [26]

A Suécia lidera na taxa de penetração do FTTH, e no caso particular de Portugal, a ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações) abriu recentemente cinco concursos para a instalação de fibra óptica nas regiões Norte, Centro, Alentejo e Algarve, Açores e Madeira, sendo o principal objectivo levar a fibra até onde chega o par de cobre. De acordo com dados divulgados pelo regulador das comunicações, no final de Setembro deste ano, existem no país 36 mil utilizadores de serviços de alta velocidade suportados em redes de nova geração. [27]

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para os trabalhos futuros, tem-se:

- Implementação de todas as funcionalidades de rede: MAC; VLAN (redes locais virtuais); Filtragem das camadas (L2 a L5) e Listas de Acesso; TR-101/ WT-156; DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*).
- Implementação das funcionalidades de gestão do tráfego da rede: Filtragem, Medição e Coloração da QoS; Policiamento e Modelação por fluxo; QoS hierárquico.

- Implementação das funções de “PON *framer*”: Reagrupamento dos pacotes de entrada; Camada de adaptação do GEM Ethernet; DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*); Encriptação.
- Implementação dos pontos referidos, anteriormente, para o ONU/ONT PON.

Referências Bibliográficas

- [1] Jeff Hecht, *City of Light: The Story of Fiber Optics*. New York: Oxford University Press, Inc., 1999.
- [2] Fiber-to-the-Home Council, *Fiber-to-the-Home.*, Feb. 2009.
- [3] António Teixeira Mário Lima, CO - Introdução aos conceitos de óptica, 08/09, Acetatos da Disciplina de opção Comunicações Ópticas.
- [4] David R. Goff, *Fiber Optic Video Transmission - The Complete Guide*. USA: Elsevier Scienc, 2003.
- [5] Timbercon. [Online]. <http://www.timbercon.com/Back-Reflection-Optical-Return-Loss.html>
- [6] [Online]. cntestes.blogspot.com
- [7] Riick. Wikimedia Commons. [Online]. upload.wikimedia.org./commons/3/32/FTTX.png
- [8] Riick. Wikipedia. [Online]. upload.wikimedia.org./350px-PON_vs_AON.png
- [9] IEEE-SA Standards Board. (2008, 26 December) IEEE Standards Association. [Online]. http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.3-2008_section1.pdf
- [10] ITU-T study group 15. (1998, October) International Telecommunication Union. [Online]. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.1-199810-S/en>
- [11] Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunication Union (ITU-T). [Online]. <http://www.itu.int/ITU-T>
- [12] IEEE802. [Online]. http://www.ieee802.org/3/efm/public/nov01/hirth_1_1101.pdf
- [13] ITU-T Study Group 15, "ITU-T Recommendation G.984.1, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics," Broadband Forum, Técnico March 2008.
- [14] João Pires. Instituto Superior Técnico. [Online]. https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/39101/1/SCO4_3.pdf
- [15] PON ring architectures for truly shared LAN capability and dynamic bandwidth allocation for fiber wireless (FiWi) applications. (01/2009) adsabs.harvard.edu. [Online]. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009SPIE.7234E.6M>
- [16] ITU-T Recommendation G.984.3, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification," Relatório Técnico March 2008.
- [17] John Bartell. (2009, Sep 22) FTTxtra. [Online]. <http://www.fttxtra.com/ftth/pon-splitter-technology/>
- [18] TurmaCO'0809, *Comunicações Ópticas e Aplicações*, António Teixeira e Mário Lima, Ed. Aveiro, Portugal, Janeiro de 2009.
- [19] AT&T, Lior Yeheskiel, ECI Telecom Tom Anschutz, "TR-156: Using GPON Access in the context of TR-101," The Broadband Forum, Técnico December 2008.
- [20] Zvika Eitan Yaakov (J) Stein. (2007, May) Digital Signal Processing - A Computer Science Perspective. [Online]. www.dspscp.com/lectures/PON.ppt
- [21] Sandro Marcelo Rossi, Atílio Eduardo Reggiani, Cláudio Miriam Regina Xavier de Barros, "Avaliação de

topologia para redes GPON com distribuição assimétrica," Campinas, jul.-dez. 2007.

- [22] Ethernity Networks. [Online]. <http://www.ethernitynet.com/PONOLTsolution.htm>
- [23] Xilinx. [Online]. <http://www.xilinx.com/products/virtex5/fxt.htm>
- [24] ITU-T Study Group 15 (2005-2008), "ITU-T Recommendation G.984.4, Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT management and control interface specification," Broadband Forum, Técnico February 2008.
- [25] FPGA and Structured ASIC Journal, "R. Associates Joins Nallatech's Growing Channel Partner Program," August 2005.
- [26] FTTH Forum, "Ultrapassar a Incerteza na Regulação, Tomar as opções certas quanto à Tecnologia e Determinar o Bussiness Case para o INvestimento," *FTTH Forum: The leading FTTH event in Europe*, no. FTTH, 3 e 4 de Novembro 2009.
- [27] ANACOM, *Spectru*, vol. Nº 121, Julho 2009. [Online].
http://www.anacom.pt/streaming/Spectru121.pdf?contentId=963208&field=ATTACHED_FILE
- [28] Kumar Shakti Singh, *GPON - The Next Generation Access Network.*, Sep 26, 2006.
- [29] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, 3rd ed.: McGraw-Hill, Burr Ridge, Ill., 2000.
- [30] N. Thorsen, *Fiber Optics and the Telecommunications Explosion*. New York: Prentice Hal, 1998.
- [31] Digital Engineering Library. (2004) Optical Communications Essentials.
- [32] David R. Goff, *Fiber Optic Video Transmission - The Complete Guide*. USA: Elsevier Science, 2003.
- [33] ITU-T Recommendation, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics,G.984.1," March 2008.
- [34] ITU-T Study Group 15, "ITU-T Recommendation G.984.2, Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON):Physical Media Dependent (PMD) layer specification," Broadband Forum, Técnico March 2003.
- [35] ITU-T Study Group 15 (2001-2004), "ITU-T Recommendation G.985, 100 Mbit/s point-to-point Ethernet based optical access system," Broadband Forum, Técnico March 2003.
- [36] Paul Eliot Green, *Fiber to the home: the new empowerment.*: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [37] S. R. Forrest, *Optical devices for lightwave communications*, S. E. Miller and I. P. Kaminow, Ed. New York: Optical Fiber Telecommunications—II, Academic, 1988.
- [38] K.S.Singh, *GPON - The Next-Gen Access Network.*, Sep 2006.
- [39] Broadband Forum Technical Report, "TR-156 Using GPON Access in the context of TR-101," Broadband Forum, Técnico December 2008.
- [40] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems*, 3rd ed.: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [41] Theodore S Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice.*: Prentice Hall, 1996.
- [42] Sharon Eisner Gillett, *Connecting Homes to the Internet: An Engineering Cost Model of Cable vs. ISDN.*, 1995.
- [43] Anthony Ng'oma, *Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems.*, 2005.
- [44] Kramer, *Ethernet Passive Optical Networks.*, 2005.

- [45] J. Brannan, K. Saito A. Cauvin, "Common Technical Specification of the G-PON System among Major Worldwide Access Carriers," *IEEE Communications Magazine*, October 2006.
- [46] S. Subramaniam K. M. Sivalingam, *Emerging Optical Network Technologies: Architectures, Protocols and Performance.*, May 2004.
- [47] S. Wilkinson, *Next-generation PON options promise greater bandwidth.*: Lightwave, July 2008.
- [48] Maurice S. O'Sullivan Rongqing Hui, *Fiber optic measurement techniques.*
- [49] Cisco. [Online]. http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_0t/12_0t1/feature/guide/l2tpT.html
- [50] Hitachi. [Online]. http://www.hitachi.com/ICSFiles/afiedfile/2004/06/01/r2000_04_107.pdf
- [51] FTTxtra. [Online]. <http://www.fttxtra.com/ftth/gpon/gpon-tutorial/>
- [52] Paul Eliot Green, *Fiber to the home: the new empowerment.*
- [53] Programmable Logic DesignLine. [Online].
<http://www.pldesignline.com/206903238;jsessionid=3F1C3SR4MOIS3QE1GHRSKHWATMY32JVN?pgno=2>
- [54] Xilinx, Inc. Navneet Rao, "FPGAs and Ethernet:Providing Programmability to Pervasive Interconnect Standard," *FPGA and Structured ASIC Journal*, July 10 2007. [Online].
http://images.google.pt/imgres?imgurl=http://www.fpgajournal.com/articles_2007/images/20070710_xilinx_fig3.jpg&imgrefurl=http://www.fpgajournal.com/articles_2007/20070710_xilinx.htm&usq= MC90-ZILKB_csX9hqv8a6W6YiBI=&h=494&w=377&sz=48&hl=pt-PT&start=16&um
- [55] ITU-T Study Group 15, "ITU-T Recommendation G.984.2, Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON):Physical Media Dependent (PMD) layer specification- Amendment 1, New Appendix III – Industry best practice for 2.488 Gbit/s downstream, 1.244Gbit/s upstream G-PON," Broadband Forum, Técnico February 2006.
- [56] ITU-T Study Group 15 (2005-2008), "ITU-T G.984.3, Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification," Broadband Forum, Técnico 03/2008.
- [57] HSW International Inc. (1998-2009) How Stuff Works. [Online]. <http://informatica.hsw.uol.com.br/fibras-opticas2.htm>
- [58] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (2007/2008) FEUP. [Online].
<http://paginas.fe.up.pt/~mines/OpE/Acetatos/FibrasOpticas/fo1.pdf>
- [59] i Pierluigi Franco, Giorgio Grasso, Marco Romagnoli, Francesco Tassone Roberto Aldegh, "Point-To-Point Optical Fibre Link," 385 32.
- [60] Stephen Davies, Keith McMahon, Tim Poulus, Jean Michel Billaut, Dirk van der Woude, Costas Troulos Kai Seim. (2008, April) Fiberevolution. [Online]. <http://www.fiberevolution.com/2008/04/revisiting-the-pon-vs-p2p-debate.html>
- [61] Pinephotonics. [Online]. www.pinephotonics.com
- [62] PMC Sierra. [Online]. <http://www.pmc-sierra.com/ftth-pon/>
- [63] John Barrow Bill Guile. (2008, March) Communities ad Local Government. [Online].
<http://www.communities.gov.uk/publications/planningandbuilding/dataductinginfrastructure>

- [64] (2007 - 2009) FTTH Council Europe. [Online]. <http://www.ftthcouncil.eu/>
- [65] (2002) VDV Works LLC. [Online]. <http://www.jimhayes.com/lennielw/fiber.html>
- [66] (2009, February) CableFax. [Online]. http://www.cablefax.com/technology/news/Study-FTTH-Revenue-Tops-DSL_34080.html
- [67] ITU-T Publications. (2009, December) ITU International. [Online]. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/e>
- [68] (2009, December) International Telecommunication Union. [Online].
<http://www.itu.int/publications/sector.aspx?lang=en§or=2>
- [69] ConsulHtech. (2009) Bloobble. [Online]. <http://www.bloobble.com/broadband-presentations/presentations?itemid=537>
- [70] Timbercon Inc. (2009) Timbercon. [Online]. <http://www.timbercon.com/Back-Reflection-Optical-Return-Loss.html>